

DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE PROFILAGE D'OUTIL DE MEULAGE ASSISTÉ PAR ROBOT

par

Oussama BEN TANFOUS

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE

MONTREAL, LE 11 SEPTEMBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Oussama Ben Tanfous, 2017

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSE DE :

M. Zhaoheng Liu, directeur de mémoire
Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Bruce Hazel, codirecteur de mémoire
Institut de Recherche d'Hydro-Québec

M. Jean-François Chatelain, président du jury
Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Éric Boudreault, examinateur externe
Institut de Recherche d'Hydro-Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 AOÛT 2017

A L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon directeur de ce mémoire, M. Zhaoheng Liu, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Son soutien, sa clairvoyance et ses compétences m'ont été d'une aide inestimable.

Je désire aussi remercier mon codirecteur, M. Bruce Hazel, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité et leurs précieux conseils qu'ils m'ont prodigués au cours de l'élaboration de ce travail.

Mes vifs remerciements pour les membres du jury qui m'ont honoré d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à mes parents pour leur soutien constant et pour m'avoir transmis leurs valeurs. Ils m'ont toujours poussé à aller plus loin, je voudrais leur dire que ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consenti pour mon éducation et ma formation.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers ma femme, mon frère et ma sœur qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE PROFILAGE D'OUTIL DE MEULAGE ASSISTÉ PAR ROBOT

Oussama BEN TANFOUS

RÉSUMÉ

L'institut de recherche d'Hydro-Québec utilise des robots portatifs pour assurer les opérations de maintenance des turbines hydroélectriques. Un des procédés le plus courants est le meulage robotisé pour réparer les surfaces endommagées. Les meules utilisées pour assurer un bon enlèvement de matière sont de type boisseau. Le meulage avec un angle constant, dans la direction d'avance et de recul, engendre un profil aléatoire de la meule. Le volume du copeau non déformé varie et le contrôle du taux d'enlèvement de matière devient difficile. D'où l'idée de créer un profil sphérique de la meule. Avec ce profil d'outil, le volume du copeau non déformé devient constant et indépendant de l'angle de meulage. L'objectif principal du projet est de développer une nouvelle méthode qui permet de créer et de maintenir un profil sphérique de la meule de type boisseau.

Des équations mathématiques sont développées pour calculer les angles de meulage en fonction de l'usure de la meule. Une fonction d'oscillation est également développée afin de contrôler le profil de la meule. Le contrôle d'enlèvement de matière et d'usure de la meule est assuré respectivement avec les modèles d'enlèvement de matière et d'usure.

Plusieurs essais de meulage sont faits pour valider les modèles d'enlèvement de matière, d'usure de la meule et d'oscillation. Pour les modèles d'enlèvement de matière et d'usure, le coefficient de corrélation est de l'ordre 0,73. Le meulage avec le modèle d'oscillation a donné de bons résultats. En effet, la forme sphérique du profil de la meule est maintenue et le rayon du profil varie avec une erreur de 4 %.

Mots-clés : Taux d'enlèvement de matière, Taux d'usure de la meule, Meule de type boisseau, Modèle d'oscillation, Profil sphérique.

DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE PROFILAGE D'OUTIL DE MEULAGE ASSISTÉ PAR ROBOT

Oussama BEN TANFOUS

ABSTRACT

Hydro-Québec's research institute uses portable robots to carry out maintenance operations for hydroelectric turbines. One of the most commonly used processes is robotic grinding to repair damaged surfaces. The grinding wheels used for grinding are cup wheel. Grinding with a constant angle, in forward and backward direction, generates a random profile of the grinding wheel. The uncut chip changes and control of material removal rate becomes difficult, hence the idea of creating a spherical profile of the grinding wheel. With this profile, the cutting surface becomes constant and independent of the grinding angle. The project's main objective is to develop a new method to create and maintain a spherical profile of the cup wheel.

Mathematical equations are developed to calculate the grinding angles as a function of the grinding wheel wear. An oscillating function is used to control the profile of the grinding wheel. The control of the material removal and the grinder wear is respectively insured with the models of the material removal rate and the wear rate of the cup wheel.

Several grinding tests are made to validate the models of the material removal rate, the wear rate and the oscillation. For the models of material removal rate and wear rate, the correlation coefficient is of the order of 0.73. The grinding with the oscillation model gave good results. Indeed, the spherical shape of the profile of the grinding wheel is maintained and the radius of the profile varies with an error of 4%.

Keywords : Material removal rate, Wheel wear rate, Cup wheel, Oscillation model, Spherical profile.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE	3
1.1 Introduction	3
1.2 Usinage par abrasion	4
1.3 Procédé de fabrication des meules	5
1.4 Type des meules	5
1.5 Type de liant	6
1.5.1 Liants minéraux	6
1.5.1.1 Liants vitrifiés	7
1.5.1.2 Magnésiens	7
1.5.2 Les liants organiques	7
1.5.2.1 Résinoïdes	7
1.5.2.2 Caoutchouc	8
1.5.2.3 Shellac	8
1.6 Dressage d'outil	8
1.6.1 Outils de dressage fixe	9
1.6.2 Outils de dressage rotatif	9
1.7 Différents types de meulage	10
1.7.1 Meulage surfacique	10
1.7.2 Meulage cylindrique	11
1.7.3 Meulage « centerless »	11
1.8 Mécanismes d'enlèvement de matière	12
1.9 Mécanismes d'usure de la meule	13
1.10 Énergie spécifique	14
1.11 Modèles d'enlèvement de matière	14
1.11.1 Introduction et définition	14
1.11.2 Formulation mathématique dans des travaux de recherche antérieurs	14
1.12 Modèle d'usure	16
1.12.1 Introduction et définition	16
1.12.2 Formulation mathématique dans des travaux de recherche antérieurs	16
1.13 Meulage robotisé	17
1.13.1 Introduction	17
1.13.2 Technologie SCOMPI	18
1.13.3 Contrôle du taux d'enlèvement de matière	19
1.13.4 Stratégie de contrôle	21
1.13.5 Cinématique de meulage	23
1.13.6 Meulage par vibro-impact	23
1.13.7 Effort de meulage	26

1.13.8	Modèle d'oscillation pour des meules à dôme sphérique	28
CHAPITRE 2	ÉTUDE DE PROFILAGE D'OUTIL DE MEULAGE	31
2.1	Introduction	31
2.2	Choix du profil de la meule	31
2.2.1	Forme du profil de la meule désirée	31
2.2.2	Choix du rayon du profil	34
2.3	Modèle d'enlèvement de la matière	37
2.3.1	Surface de coupe	37
2.3.2	Modélisation de l'enlèvement de la matière	39
2.4	Modèle d'usure de la meule	39
2.4.1	Volume d'usure	39
2.4.2	Modélisation de l'usure de la meule	43
2.5	Modèle d'oscillation	44
2.5.1	Angles géométriques de la meule dans le régime transitoire	44
2.5.2	Angles géométriques de la meule dans le régime permanent	48
2.5.3	Angles de meulage dans le régime transitoire et permanent	51
2.5.4	Correction des angles de meulage	54
2.5.4.1	Influence de la géométrie de copeau non déformé sur les angles de meulage	54
2.5.4.2	Influence de la rigidité du robot sur les angles de meulage	56
2.5.5	Conception d'un logiciel pour le calcul des angles de meulage	59
2.5.6	Fonction d'oscillation	60
CHAPITRE 3	SYSTEME DE PROFILAGE DE MEULE ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX	65
3.1	Introduction	65
3.2	Taillage de la meule	65
3.2.1	Première solution – utilisation d'un mécanisme de profilage manuel de meule	65
3.2.2	Deuxième solution – utilisation d'une machine CNC	66
3.2.3	Troisième solution – taillage sur le robot SCOMPI	67
3.3	Essais expérimentaux	67
3.3.1	Méthodologie	67
3.3.2	Profilage de la meule	69
3.3.2.1	Régime transitoire	71
3.3.2.2	Régime permanent	74
3.3.3	État de surface de la plaque après le meulage	78
3.3.4	Taux d'enlèvement de matière	79
3.3.5	Taux d'usure	81
CONCLUSION	83
RECOMMANDATIONS	85

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87
--	----

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3-1	Plan d'expérience pour les essais de profilage68
Tableau 3-2	Plan d'expérience pour les essais de validation du modèle d'enlèvement de matière et d'usure de la meule68
Tableau 3-3	Numérisation de la surface du profil de la meule75
Tableau 3-4	Plan d'expérience de meulage sans chevauchement78
Tableau 3-5	Plan d'expérience de meulage sans chevauchement79

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Éléments de meulage3
Figure 1.2	Grains sur un support4
Figure 1.3	Orientation aléatoire.....5
Figure 1.4	Type de meule (Marinescu et al., 2006)6
Figure 1.5	Meule avant et après avivage9
Figure 1.6	(a) Diamant à pointe unique (b) Diamants de dressage (c) Plaquette à aiguilles MCD ou CVD (d) Plaquettes de dressage (Studer, 2012).....9
Figure 1.7	(a) Molette de dressage (b) Molette profilée (Studer, 2012)10
Figure 1.8	Meulage surfacique11
Figure 1.9	Meulage cylindrique11
Figure 1.10	Meulage centerless12
Figure 1.11	Les trois modes d'enlèvement de matière.....13
Figure 1.12	Différents types d'usure de la meule14
Figure 1.13	Robot monté sur une turbine.....18
Figure 1.14	Robot SCOMPI.....19
Figure 1.15	Contrôle hybride Force/position19
Figure 1.16	Meulage avec une meule de type boisseau20
Figure 1.17	ISO-surfaces (en violet)22
Figure 1.18	Évolution de l'erreur en fonction22
Figure 1.19	Le meulage robotisé (Figure à gauche), le meulage conventionnel (Figure à droite) (Tahvilian, Hazel, Rafieian, Liu, & Champlaud, 2016)23

Figure 1.20	Visualisation de l'impact par une caméra.....	24
Figure 1.21	Courbe de vitesse et de force en fonction du nombre de tours	25
Figure 1.22	Diagramme de probabilité de nombre d'impact par tour.....	26
Figure 1.23	Géométrie de coupe (a) en usinage (Altintas, 2000) et (b) en meulage.....	27
Figure 1.24	(a) Partie sphérique de la meule composée.....	28
Figure 1.25	Fonction d'oscillation modélisée (Agnard, 2013)	29
Figure 2.1	Meule de type embout (a) Vue de face (b) Vue isométrique.....	32
Figure 2.2	(a) Meule neuve (b) Meule profilée avec un profil sphérique	32
Figure 2.3	Forme de l'entaille réalisée par la meule	33
Figure 2.4	Forme du copeau non déformé avec un angle de meulage égal à (a) 7° (b) 10° (c) 14°	34
Figure 2.5	Profondeur de passe comparée à l'épaisseur de la zone sphérique	35
Figure 2.6	Choix du rayon de meulage	37
Figure 2.7	Surface de coupe	38
Figure 2.8	Paramètres géométriques d'une (a) meule neuve (b) meule profilée	41
Figure 2.9	Volume d'usure de la meule.....	42
Figure 2.10	Oscillation de la meule (a) Angle minimum (b) Angle maximum	44
Figure 2.11	(a) Meule neuve (b) Meule légèrement usée (c) Meule avec un profil sphérique (au cours du régime transitoire) (d) Meule complètement profilée (fin du régime transitoire)	45
Figure 2.12	Schéma simplifié de la meule	47
Figure 2.13	Schéma simplifié de la meule	50
Figure 2.14	Angle limite d'oscillation	53
Figure 2.15	Position du point de contact (a) dans la direction d'avance (b) dans la direction de recul.....	54

Figure 2.16	Effet de bord du copeau non déformé.....	55
Figure 2.17	Angles de meulage corrigés	56
Figure 2.18	Position du centre de masse	57
Figure 2.19	Interface graphique du logiciel du calcul des angles de meulage	60
Figure 2.20	(a) Volume d'usure local (b) Volume d'usure global	62
Figure 2.21	Angle de meulage en fonction du temps de meulage	63
Figure 3.1	Assemblage d'un mécanisme de profilage de meule manuelle	66
Figure 3.2	Profilage d'une meule de type boisseau à l'aide d'une CNC	66
Figure 3.3	HandyScan	68
Figure 3.4	Méthode de choix du coefficient ε	69
Figure 3.5	(a) Nuage de points du profil de la meule.....	70
Figure 3.6	Profil sphérique de la meule dans le régime transitoire	71
Figure 3.7	Courbe d'évolution du rayon du profil en fonction du rayon interne de la meule.....	72
Figure 3.8	Photo réelle de la meule et numérisation du profil de la meule dans le régime transitoire	73
Figure 3.9	Profil sphérique de la meule dans le régime permanent	74
Figure 3.10	Courbe d'évolution du rayon du profil en fonction de la hauteur de la meule.....	75
Figure 3.11	Meulage sans chevauchement de passes.....	78
Figure 3.12	Meulage avec chevauchement de passes	79
Figure 3.13	Puissance de meulage en fonction du taux d'enlèvement de matière.....	81
Figure 3.14	Taux d'usure de la meule en fonction du taux d'enlèvement de matière....	82

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CNC	Commande numérique par ordinateur (<i>computer numerical control</i>)
IREQ	Institut de Recherche d'Hydro-Québec
SCOMPI	Robot super compact de l'IREQ (<i>Super COMPact robot Ireq</i>)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

a	Épaisseur du dôme sphérique (m).
a_p	Profondeur de coupe (m).
b_n	Paramètres géométriques de la meule (m).
D_1	Équation de la droite.
d_r	Distance entre le centre du premier joint du robot et le point d'application de la force normal au robot (m).
d	Hauteur de crête (m).
d_i	Distance entre la surface supérieure de la meule et le centre du profil sphérique (m).
dh	Déplacement infinitésimal de la hauteur de la meule dû à l'usure (m).
C_1	Équation du cercle.
c_z	Compliance du robot dans la direction normale (m/N).
D	Épaisseur maximale de la matière à enlever pour profiler la meule (m).
E	Largeur du copeau (m).
E_1	Épaisseur du disque (m).
E_m	Épaisseur de la meule (m).
E_s	Énergie spécifique (J/m^3).
e	Épaisseur du copeau non déformé (m).
F_{n0}	Force normale seuil (N).
F_n	Force normale (N).
F_T	Force tangentielle (N).

H	Hauteur de la meule (m).
H_0	Hauteur de la meule à $t = 0$ (m).
I	Distance entre les passes (m).
K	Énergie spécifique (j/m^3).
K_p	Constante d'enlèvement de matière (m^2/N).
K_i	Constante empirique.
k	Rigidité en torsion du robot ($N.m/rad$).
k_p	Gain du système (Hz).
k_e	Coefficient de force latérale (N/m).
k_c	Coefficient de coupe associé aux forces de déformation (N/m^2).
M_c	Matrice de coupe.
M_t	Matrice de temps.
M_u	Matrice d'usure.
N	La vitesse de rotation de la meule ($tour/min$).
n_c	Nombre d'impact par tour. ($impact/tour$).
n_a	Coefficient de multiplication.
P_0	Puissance seuil (W).
P_m	Puissance mesurée (W).
P_d	La puissance désirée (W).
P	Puissance de meulage (W).
R_{EFF}	Rayon effectif du robot (m).

R_p	Rayon de profil de la meule (m).
R	Rayon de la meule (m).
r_c	Rayon de contact (m).
r_{0int}	Rayon interne de la meule à $t=0$ (m).
r_{0ext}	Rayon externe de la meule à $t=0$ (m).
r_{int}	Rayon interne de la meule (m).
r_{ext}	Rayon externe de la meule (m).
S	Surface du copeau non déformé (m^2).
$S_{projetée}$	Surface du profil de la meule projetée (m^2).
t	Temps de meulage (s).
T	Période d'oscillation (s).
V_c	Vitesse de coupe (m/s).
v_f	Vitesse d'avance (m/s).
V_{chip}	Volume du copeau non déformé (m^3).
V_{usure}	Volume d'usure de la meule (m^3).
$V_{u,local}$	Volume d'usure local (m^3).
x_r	Coordonnées cartésiennes en X (m).
y_H	Coordonnées cartésiennes en Y (m).
Z_w	Taux d'enlèvement de matière (m^3/s).
Z_s	Usure de la meule (m^3/s).
$Z_{s,local}$	Taux d'usure local (m^3/s).

$Z_{s,local}$	Taux d'usure global (m^3/s).
Λ_w	Constante d'enlèvement de matière ($m^3N^{-1}s^{-1}$)
α_m	Angle de conicité de la meule de type boisseau (rad).
β	Angle d'inclinaison de la meule (rad).
β_{max}	Angle géométrique maximum de la meule (rad).
β_{min}	Angle géométrique minimum de la meule (rad).
β_{Amin}	Angle de meulage minimum dans la direction d'avance (rad).
β_{Amax}	Angle de meulage maximum dans la direction d'avance (rad).
β_{Rmin}	Angle de meulage minimum dans la direction de recul (rad).
β_{Rmax}	Angle de meulage maximum dans la direction de recul (rad).
$\beta_{Amin,c}$	Angle de meulage minimum corrigé dans la direction d'avance (rad).
$\beta_{Amax,c}$	Angle de meulage maximum corrigé dans la direction d'avance (rad).
$\beta_{Rmin,c}$	Angle de meulage minimum corrigé dans la direction de recul (rad).
$\beta_{Rmax,c}$	Angle de meulage maximum corrigé dans la direction de recul (rad).
β_{moy_min}	Angle moyen de meulage minimum (rad).
β_{moy_max}	Angle moyen de meulage maximum (rad).
$\Delta\beta$	Intervalle d'angle d'oscillation de la meule (rad).
$\Delta\beta_{max_critique}$	Intervalle d'angle limite critique maximum de la meule (rad).
$\Delta\beta_{min_critique}$	Intervalle d'angle limite critique minimum de la meule (rad).
θ	Angle d'immersion de la meule sur la pièce (rad).
θ_c	Angle de correction (rad).

μ	Coefficient de friction.
ω	Vitesse de rotation de la meule (<i>rad/s</i>).
ε	Pourcentage de décalage de l'angle d'immersion.
λ	Angle qui sépare le point normal à la surface de contact et le centre de masse du copeau non déformé (<i>rad</i>).
δ	Déflexion angulaire du robot (<i>rad</i>).
$\delta_{\text{à vide}}$	Déflexion angulaire du robot à vide (<i>rad</i>).

INTRODUCTION

Le meulage est généralement utilisé dans les opérations de finition et de rectification des surfaces. Toutefois, dans les opérations de maintenance des roues de turbine le meulage est utilisé pour enlever beaucoup de matière tout comme avec l'usinage. Depuis 20 ans, l'Institut de recherche d'Hydro-Québec utilise un robot SCOMPI pour assurer les opérations de maintenance in situ des équipements des centrales hydroélectriques.

Le robot SCOMPI est un bras robotisé à 6 degrés de liberté, de masse très faible par rapport à la majorité des bras de robots industriels (Li, 2016), et possède une structure compacte. Le robot est doté d'une faible rigidité structurelle qui lui donne une grande flexibilité. Cette caractéristique donne naissance à des vibrations au niveau de la meule pendant le meulage. L'enlèvement de matière se fait, dans ce cas, par vibro-impact.

Les meules de type boisseau sont généralement utilisées pour le meulage des surfaces à faible courbure, telles que les aubes de turbine et les voies de roulement. La problématique avec ce type de meule réside dans le meulage avec un angle constant sur une pièce. Le contrôle de l'usure de la meule et du taux d'enlèvement de matière, dans ce cas, s'avère très difficile. Sans oscillation de la meule, la conformité entre la meule et la pièce à meuler augmente, le taux d'enlèvement de matière se modifie tout au long du processus et la meule peut se glacer. Dans le cas spécifique où le meulage se fait dans la direction d'avance et de recul, un profil aléatoire se crée sur la meule. Avec ce profil la surface de coupe devient sensible au changement d'angle de meulage et le taux d'enlèvement de matière varie.

L'objectif de ce projet est de développer une méthode qui assure le contrôle du profil de la meule pour stabiliser le taux d'enlèvement de matière. Cet objectif est divisé alors en plusieurs sous-objectifs :

- Détermination du profil idéal de la meule à maintenir au cours du meulage.
- Détermination de la fonction d'oscillation de l'outil qui assure le maintien du profil de la meule.

- Validation expérimentale de l'efficacité de la fonction d'oscillation sur le maintien du profil de la meule.
- Validation expérimentale du modèle d'enlèvement de matière et d'usure de la meule.

Le premier chapitre de ce projet décrit les concepts de base du meulage, sur les différents modèles d'enlèvement de matière et d'usure de la meule et une présentation du meulage robotisé avec le robot SCOMPI. Le deuxième chapitre présente une étude de profilage d'outil de meulage. Le troisième chapitre présente la validation expérimentale des modèles d'oscillation, d'enlèvement de matière et d'usure. Dans le dernier chapitre, des recommandations sont présentées pour bien améliorer le contrôle de l'usure de la meule et le contrôle de l'enlèvement de matière.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTERATURE

1.1 Introduction

Le meulage est un processus d'enlèvement de matière utilisé généralement pour rectifier des pièces métalliques tel que présenté dans la Figure 1.1. La précision des finis de surface obtenue par l'opération de meulage est dix fois plus importante qu'avec le tournage et le fraisage (Suzuki, Kodera, Nakasuji, Ohta, & Syoji, 1998).

La meule est composée de grains abrasifs liés entre eux par un liant. Ces grains agissent sur la matière comme un outil de coupe en enlevant à chaque fois une fine partie de la pièce à meuler. Le processus d'usure de la meule apparaît au niveau des grains abrasifs. Ces derniers peuvent s'user, se fracturer ou se détacher du liant pour former ainsi de nouvelles arêtes de coupe ou de nouveaux grains qui jouent le rôle d'outil de coupe (Marinescu, Hitchiner, Uhlmann, Rowe, & Inasaki, 2006). D'une façon générale, pour assurer un bon meulage, il faut que l'abrasif soit plus dur que la pièce à meuler et, de plus, il doit être résistant aux chocs et à la chaleur.

Dans les paragraphes qui suivent, une présentation détaillée sur les notions élémentaires du meulage sera donnée.



Figure 1.1 Éléments de meulage
(Hashemipour, 2014)

1.2 Usinage par abrasion

L'usinage par abrasion est un procédé d'enlèvement de matière qui utilise les grains abrasifs comme un outil de coupe, voir Figure 1.3. D'une façon générale, il existe trois procédés d'enlèvement de matière par abrasion qui diffèrent par la structure des grains et le type de liant (Hashemipour, 2014) :

- Abrasifs agglomérés : les grains abrasifs sont liés entre eux par un liant et peuvent prendre plusieurs formes pour former des outils de meules.
- Abrasifs sur un support (Figure 1.2) : les grains abrasifs sont collés sur un support qui peut être une toile souple, un papier ou une résine.
- Abrasifs libres : les grains abrasifs, dans ce cas, ne sont pas liés entre eux. Ils sont introduits directement dans l'huile ou dans l'eau ou dans l'air.



Figure 1.2 Grains sur un support
(Kalpakjian, 2008)

Quel que soit le procédé d'enlèvement de matière par abrasion, le contrôle du taux d'enlèvement de matière constitue un défi, car la géométrie des grains est généralement aléatoire. De ce fait, il faut faire plusieurs opérations d'usinage par abrasion pour atteindre les précisions dimensionnelles voulues (Hashemipour, 2014).

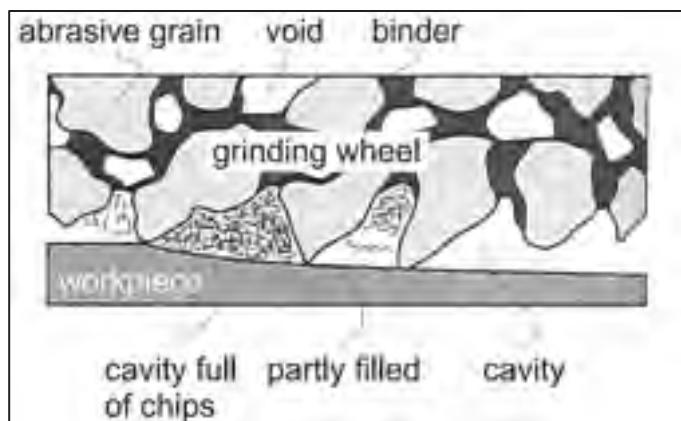


Figure 1.3 Orientation aléatoire des grains (Hashemipour, 2014)

1.3 Procédé de fabrication des meules

Le procédé de fabrication des meules se compose de cinq étapes qui sont : le malaxage, le pressage, la cuisson, l'usinage et le contrôle. L'opération de malaxage consiste à mélanger la matière première (grains abrasifs, agglomérants et additifs) dans un malaxeur. L'étape suivante consiste à presser le mélange dans un moule. Ensuite, une opération d'usinage avant cuisson est réalisée sur la meule pour la ramener à une forme plus proche de la forme finale. La cuisson de la pièce est faite dans un four et enfin une opération d'usinage donne la forme finale (Douzet, 1990).

1.4 Type des meules

Le procédé de meulage peut être utilisé dans un grand nombre d'applications. La taille et la forme des meules dépendent de l'application. Par exemple, la masse de la meule varie de quelques dixièmes de gramme pour des applications de rectification des bagues de roulement miniature, jusqu'à des tonnes pour les meules de défibrage du bois utilisées en papèterie (Douzet, 1990). Il existe plusieurs formes de meule pour différentes applications, voir Figure 1.4.

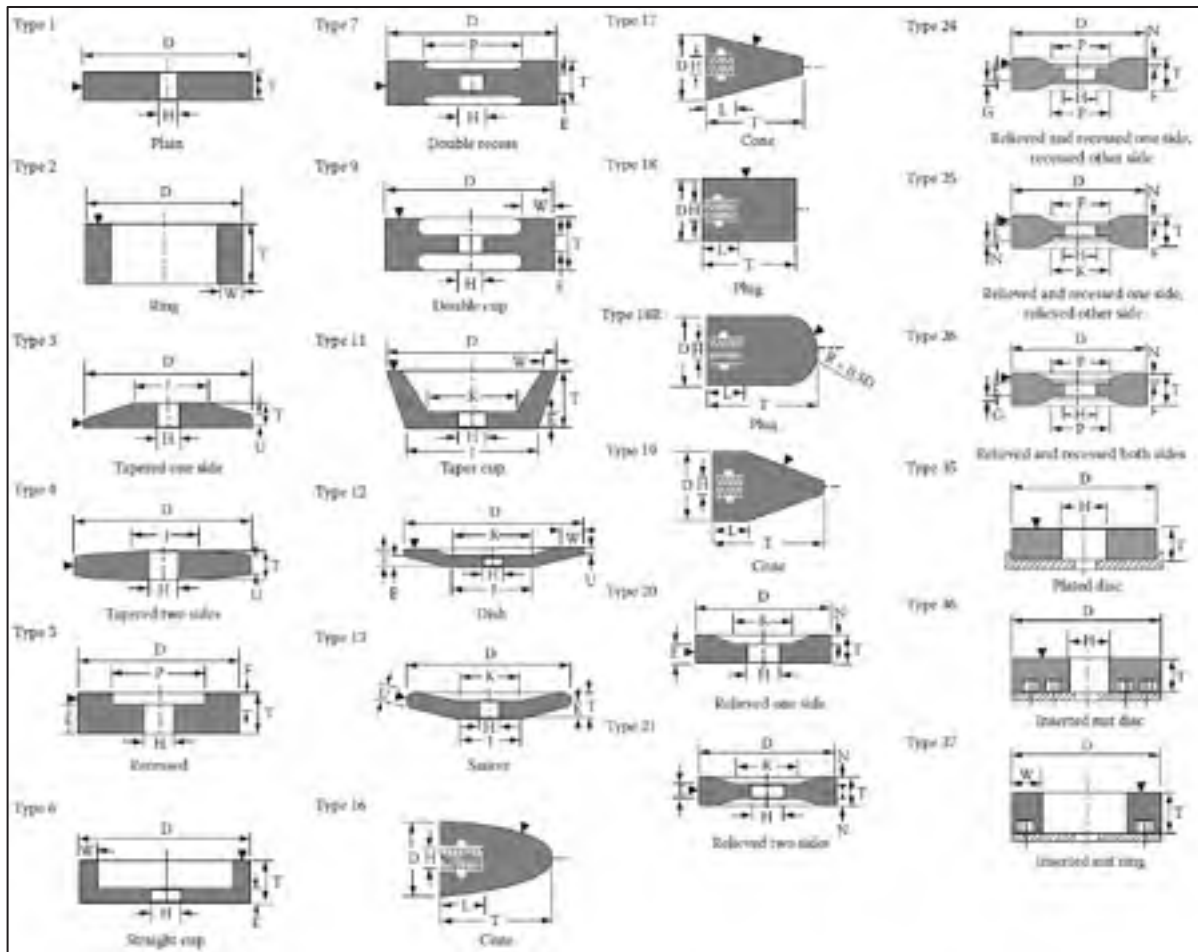


Figure 1.4 Type de meule (Marinescu et al., 2006)

1.5 Type de liant

Le liant est un matériau qui permet d'attacher les grains abrasifs entre eux. Dans l'industrie, il existe deux grandes familles de liant ou d'agglomérant : les liants minéraux et les liants organiques.

1.5.1 Liants minéraux

Il y a deux types de liants minéraux : les liants vitrifiés et les liants magnésiens.

1.5.1.1 Liants vitrifiés

Les liants vitrifiés sont très utilisés dans l'industrie pour des applications de production en série qui nécessitent une grande précision (Thuot et al., 2013).

Les liants vitrifiés sont de même structure que la porcelaine, ils sont composés principalement par le feldspath, l'argile et la silice. La teneur de ces composants dépend de l'application réalisée avec le meulage (affûtage d'outils, rectification...) et des contraintes de meulage (taux d'enlèvement de matière, échauffement...).

Les liants vitrifiés sont chimiquement stables avec l'eau et l'agent de lubrification. Seuls les acides borique et fluorhydrique peuvent attaquer chimiquement le liant vitrifié (Douzet, 1990). Le liant vitrifié possède une bonne stabilité à haute température, une bonne rigidité et une bonne capacité à supporter un niveau élevé de porosité (Marinescu et al., 2006).

1.5.1.2 Magnésiens

Les liants magnésiens sont obtenus par une réaction entre le magnésium et la magnésie, ils se présentent sous forme de ciment.

Ce type de liants est caractérisé par une bonne évacuation de chaleur. Les meules qui possèdent des liants magnésiens sont utilisées dans des opérations d'affûtage d'outils et de surfacage de la pierre et du marbre (Douzet, 1990).

1.5.2 Les liants organiques

Les liants organiques sont de trois types qui sont les résinoïdes, le caoutchouc et le shellac.

1.5.2.1 Résinoïdes

C'est une résine constituée généralement à base de phénol et de formol. Une fois polymérisé, ce liant présente une excellente résistance à la force centrifuge. Il est caractérisé par un module

d'élasticité et de conductivité thermique supérieur à ceux des agglomérants vitrifiés (Douzet, 1990).

1.5.2.2 Caoutchouc

Les agglomérants à base de caoutchouc sont obtenus à partir du caoutchouc naturel appelé latex ou bien à partir du caoutchouc synthétique.

Les agglomérants à base de caoutchouc naturel sont utilisés pour la fabrication de meules de contrôle *centerless* et de rectification de gorge de roulement. Les caoutchoucs synthétiques sont réservés à la fabrication de meules de tronçonnage ou de roues flexibles pour le satinage de tôles (Douzet, 1990).

1.5.2.3 Shellac

Ce produit naturel constitué par les excréments d'un insecte est travaillé à chaud. Il permet la réalisation des meules de tronçonnages très minces et des meules destinées à obtenir des surfaces rectifiées de haute qualité (Douzet, 1990).

1.6 Dressage d'outil

Après un certain temps de meulage, la meule s'use et perd sa forme initiale ou bien se glace. L'opération de dressage d'outil dans ce cas devient essentielle pour remettre l'outil à sa forme initiale (Subramanian, 1994).

Le dressage est réalisé généralement en deux étapes qui sont le taillage et l'avivage :

- Le taillage consiste à éliminer toute sorte d'excentricité dans la meule et assurer ainsi un profil concentrique à l'axe de la meule. Il permet aussi de renouveler les grains. Une fois le taillage réalisé, la surface de la meule devient lisse et uniforme entre l'agglomérant et les grains.
- L'avivage est nécessaire pour enlever le liant et faire apparaître les arêtes de coupe qui sont les grains abrasifs, voir Figure 1.5 (Douzet, 1990).

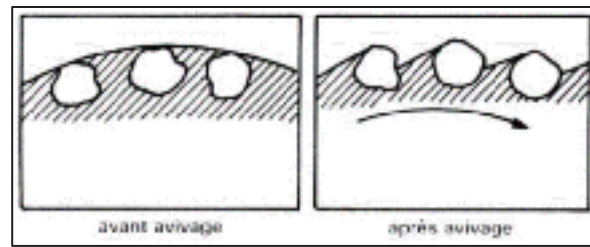


Figure 1.5 Meule avant et après avivage
(Douzet, 1990)

Pour les outils de dressage, on distingue deux grandes familles :

- Outils de dressage fixe.
- Outils de dressage rotatif.

1.6.1 Outils de dressage fixe

Les outils de dressage fixe (Figure 1.6) sont très utilisés dans l'industrie, car ils sont caractérisés par un coût, à l'achat, moins élevé. L'inconvénient majeur de ces outils est leur durée de vie qui est beaucoup moins importante que celle des outils de dressage rotatifs (Studer, 2012).

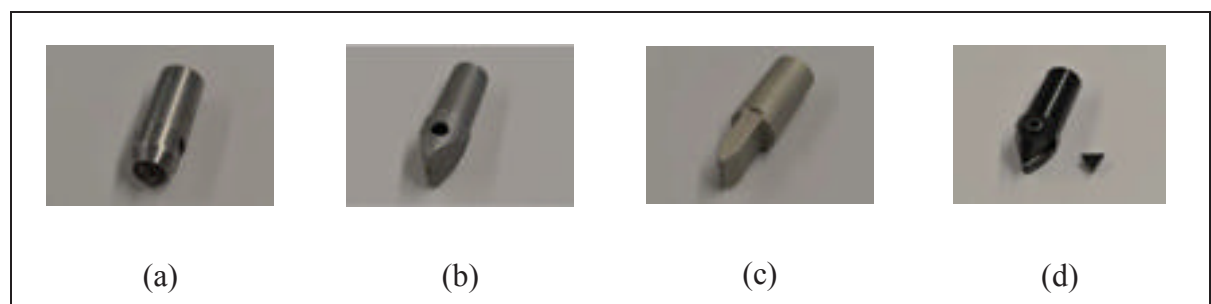


Figure 1.6 (a) Diamant à pointe unique (b) Diamants de dressage (c) Plaquette à aiguilles MCD ou CVD (d) Plaquettes de dressage (Studer, 2012)

1.6.2 Outils de dressage rotatif

Les outils de dressage rotatifs (voir Figure 1.7) sont caractérisés par une longue durée de vie. Ils sont utilisés pour faire le dressage des abrasifs très durs tels que CBN (cubic boron nitride en anglais) et diamants, mais le coût de ces outils est élevé. Des accessoires sont nécessaires

pour assurer leur fonctionnement par exemple : broche, convertisseur de fréquence... (Studer, 2012).

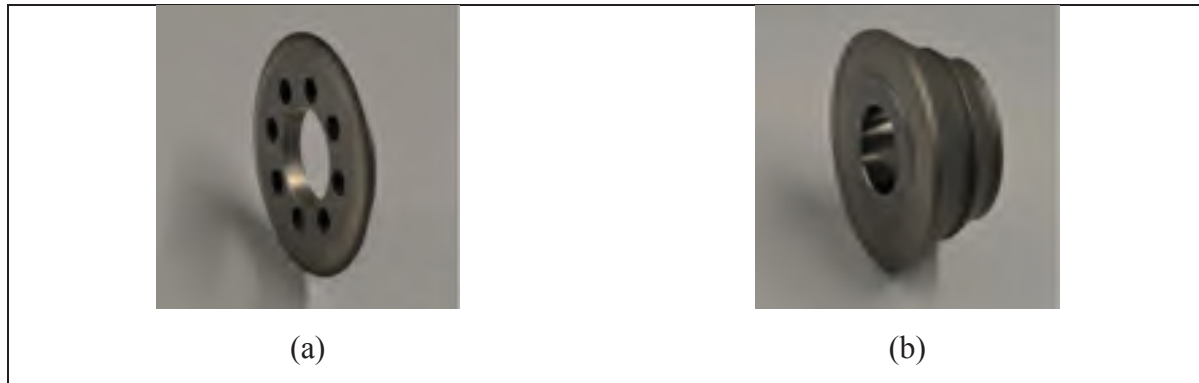


Figure 1.7 (a) Molette de dressage (b) Molette profilée (Studer, 2012)

1.7 Différents types de meulage

Il existe 3 grandes familles :

- Meulage surfacique.
- Meulage cylindrique.
- Meulage « centerless ».

1.7.1 Meulage surfacique

Le meulage surfacique (Figure 1.8) est un procédé qui permet de faire la rectification des surfaces planes. En meulage surfacique, la position de l'axe de la meule est horizontale ou verticale et la pièce adopte un mouvement d'avance\recul ou de rotation.

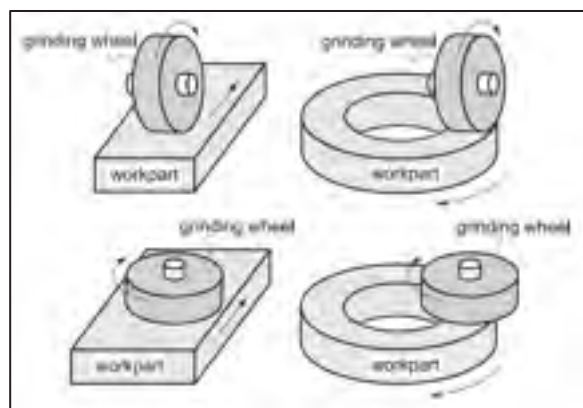


Figure 1.8 Meulage surfacique
(Hashemipour, 2014)

1.7.2 Meulage cylindrique

Dans l'opération de meulage cylindrique, la surface interne et externe de la pièce cylindrique est rectifiée (Figure 1.9). Dans le meulage cylindrique externe, la pièce à meuler tourne et fait un mouvement d'avance et de recul. Ainsi pour le meulage cylindrique interne, une petite meule cylindrique est insérée à l'intérieur du diamètre interne de la pièce. Dans ce cas, la meule fait un mouvement d'avance et de recul et la pièce tourne à grande vitesse.

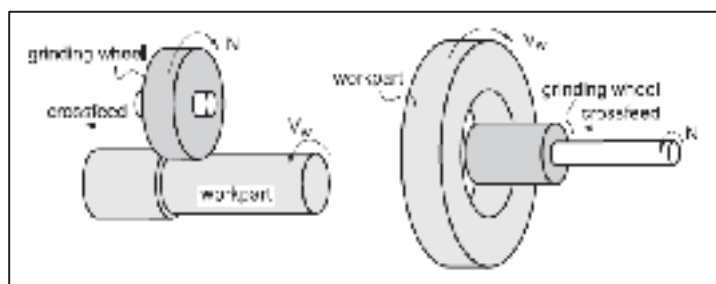


Figure 1.9 Meulage cylindrique
(Hashemipour, 2014)

1.7.3 Meulage « centerless »

Le meulage centerless est un processus de meulage cylindrique externe utilisé dans les grandes productions (Figure 1.10). La pièce est meulée entre deux meules cylindriques. La grande

meule cylindrique assure le meulage et la petite meule, appelée généralement la meule porteuse, assure le mouvement de la pièce à meuler.

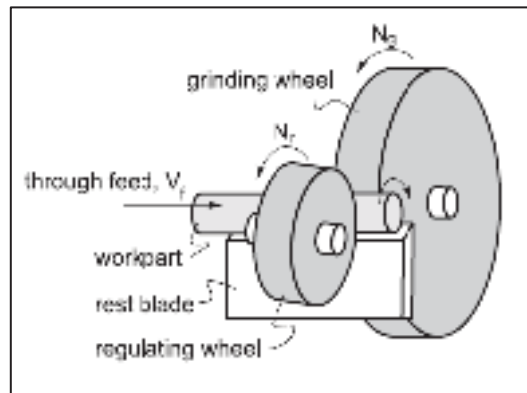


Figure 1.10 Meulage centerless
(Hashemipour, 2014)

1.8 Mécanismes d'enlèvement de matière

La meule est considérée comme une fraise à plusieurs dents réparties aléatoirement. Chaque dent participe à l'enlèvement de matière sous forme de copeau.

Les machines utilisées dans le fraisage et dans le tournage sont très rigides. La forme de l'outil est connue d'avance, ce qui permet de bien connaître l'empreinte de l'outil dans la pièce et de bien prédire l'enlèvement de matière. À l'encontre dans le meulage, plusieurs grains répartis aléatoirement participent en même temps pour enlever la matière. Le nombre de grains qui participe à l'enlèvement de matière varie toujours, ce qui rend la prédiction du volume de coupe difficile.

Il existe trois phénomènes d'enlèvement de matière, voir Figure 1.11 (Marinescu et al., 2006):

- Micro-labourage :

Ce mode ne favorise pas l'enlèvement de matière. Les grains abrasifs entraînent une déformation élastoplastique de la matière.

- Micro-coupage :

Ce mode permet de faire l'usinage idéal de la matière. Le volume de la matière enlevé est égal à la trace du grain abrasif.

- Micro-fracture :

Dans ce mode, il y a la formation de fissure lors de l'enlèvement de matière. Le volume de la matière enlevé est supérieur à la trace laissée par le grain abrasif.

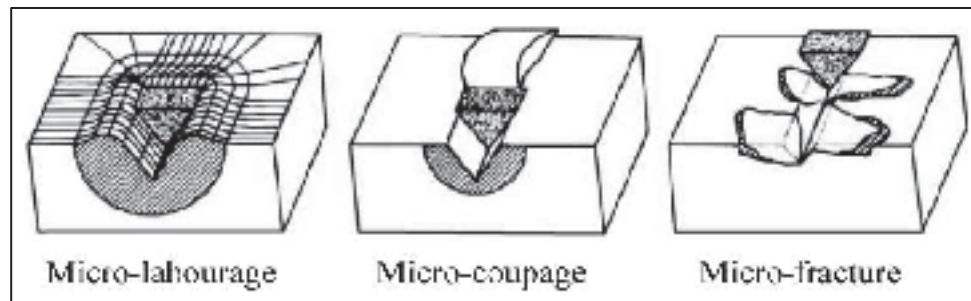


Figure 1.11 Les trois modes d'enlèvement de matière
Adaptée de Marinescu et al. (2006)

1.9 Mécanismes d'usure de la meule

Les meules se distinguent par un caractère auto-affûtant. Au cours du meulage, les grains abrasifs se détachent du liant ou se fracturent pour faire apparaître de nouveaux grains ou de nouvelles arêtes de coupe. La Figure 1.12 montre quatre types d'usures en fonction de la température de la zone de contact et de la force appliquée par grain. Le premier type d'usure est la fracture totale. Ce mode d'usure se manifeste lorsque le grain est très résistant à la fracture. La macro-fracture et la micro-fracture des grains sont deux modes d'usure qui se manifestent à l'échelle macroscopique et microscopique. Chaque grain qui se fracture donne naissance à de nouvelles arêtes de coupe ce qui minimise l'usure de la meule tout en assurant un bon taux d'enlèvement de matière. Le dernier mode d'usure est le glaçage. Ce type d'usure est caractérisé par une grande température dans la zone de contact et un très faible taux d'enlèvement de matière (Marinescu et al., 2006).

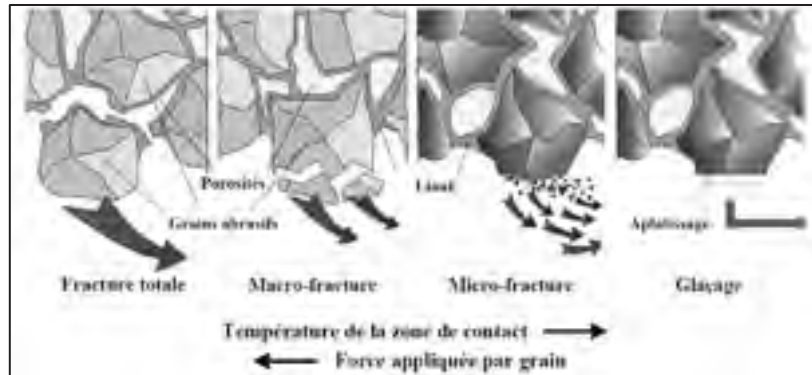


Figure 1.12 Différents types d'usure de la meule
(Jackson & Davim, 2011)

1.10 Énergie spécifique

L'énergie spécifique est la quantité d'énergie nécessaire pour enlever 1 mm^3 de matière. Cela signifie que plus l'énergie spécifique est petite, plus il est facile d'enlever le même volume de matière. Donc le procédé de meulage sera plus efficace (Thuot, 2010). Mathématiquement, l'énergie spécifique est le rapport entre la puissance de meulage et le taux d'enlèvement de matière.

$$E_s = \frac{P}{Z_w} \quad (1.1)$$

1.11 Modèles d'enlèvement de matière

1.11.1 Introduction et définition

Le mécanisme d'enlèvement de matière est très complexe, car la répartition et la forme des grains abrasifs sont aléatoires et le nombre de grains qui enlève la matière est variable. Ces caractéristiques rendent la prédiction du taux d'enlèvement de matière très complexe. De nombreuses recherches sont réalisées pour élaborer le modèle d'enlèvement de matière.

1.11.2 Formulation mathématique dans des travaux de recherche antérieurs

Le premier modèle d'enlèvement de matière Z_w est réalisé par Pereston (1927) :

$$Z_w = K_p F_n V_c \quad (1.2)$$

Ce modèle d'enlèvement de matière dépend directement de la vitesse de coupe v_c et de la force normale F_n de meulage et K_p est un coefficient qui doit être trouvé empiriquement.

Ensuite, Lindsay et Hahn (1971b) ont défini un modèle d'enlèvement de matière basé seulement sur l'effort normal de meulage.

$$z_w = \Lambda_w (F_n - F_{n0}) \quad (1.3)$$

Le coefficient de proportionnalité Λ_w appelé paramètre d'enlèvement de matière dépend seulement de la vitesse de coupe. F_{n0} est la force normale qui assure la formation de copeaux.

Dans les applications robotisées, Kurfess et al. (1987) développent un modèle linéaire entre le taux d'enlèvement de matière et la puissance de meulage :

$$Z_w = K_1 P + K_2 \quad (1.4)$$

La puissance P est la puissance mesurée de meulage et les coefficients K_1 et K_2 sont déterminés expérimentalement.

Toujours dans le meulage robotisé, Thuot (2010) a développé un modèle de premier ordre qui linéarise le taux d'enlèvement de matière avec la vitesse de coupe et la puissance de meulage ou l'effort normal de meulage :

$$Z_w = K_1 P + K_2 V_c + K_3 \quad (1.5)$$

$$Z_w = K_1 F_n + K_2 V_c + K_3 \quad (1.6)$$

Toutefois, l'utilisation des équations de deuxième ordre assure une bonne corrélation (Thuot, 2010) :

$$Z_w = K_1 P^2 + K_2 V_c^2 + K_3 P + K_4 V_c + K_5 \quad (1.7)$$

$$Z_w = K_1 F_n^2 + K_2 V_c^2 + K_3 F_n + K_4 V_c + K_5 \quad (1.8)$$

En 2004, Hazel a développé un modèle d'enlèvement de matière semi-empirique.

$$P = k_e n_c N S + k_c Z_w \quad (1.9)$$

Les constantes k_e et k_c représentent respectivement le coefficient de force latérale associé à l'effort de friction et le coefficient de coupe associé à l'effort de déformation. Ces coefficients sont déterminés empiriquement. L'avantage principal de ce modèle est qu'il tient compte de la géométrie de la surface de coupe S , du nombre de contact par tour n_c et de la vitesse de rotation N .

1.12 Modèle d'usure

1.12.1 Introduction et définition

Les meules se distinguent par un caractère auto-affûtant. Lors du meulage, les grains peuvent se détacher du liant pour faire apparaître de nouveaux grains qui jouent le rôle d'arête de coupe. Ce processus d'usure dépend de plusieurs paramètres tels que le type de liant, le type des grains et les conditions de coupes.

1.12.2 Formulation mathématique dans des travaux de recherche antérieurs

La majorité des modèles d'usure proposés dans la littérature sont des modèles empiriques. Lindsay et Hahn (1971a) ont proposé un modèle d'usure Z_s proportionnel au taux d'enlèvement de matière Z_w :

$$Z_s = k_1 Z_w \quad (1.10)$$

Malkin et Guo (2008) ont ajouté un exposant k_2 au taux d'enlèvement de matière. Ce modèle est utilisé pour les opérations de tronçonnage et d'ébavurage :

$$Z_s = k_1 Z_w^{k_2} \quad (1.11)$$

Il y a des modèles polynomiaux de premier, de deuxième et de troisième ordre purement empirique proposés par Thuot (2010) qui lient le taux d'usure avec la puissance de meulage P ou la force normale F_n et la vitesse de coupe V_c :

$$Z_s = K_1P + K_2V_c + K_3 \quad (1.12)$$

$$Z_s = K_1F_n + K_2V_c + K_3 \quad (1.13)$$

$$Z_s = K_1P^2 + K_2V_c^2 + K_3P + K_4V_c + K_5 \quad (1.14)$$

$$Z_s = K_1F_n^2 + K_2V_c^2 + K_3F_n + K_4V_c + K_5 \quad (1.15)$$

$$Z_s = K_1P^3 + K_2V_c^3 + K_3P^2V_c + K_4PV_c^2 + \dots \quad (1.16)$$

$$K_5P^2 + K_6V_c^2 + K_7PV_c + K_8P + K_9V_c + K_{10}$$

$$Z_s = K_1F_n^3 + K_2V_c^3 + K_3F_n^2V_c + K_4F_nV_c^2 + \dots \quad (1.17)$$

$$K_5F_n^2 + K_6V_c^2 + K_7F_nV_c + K_8F_n + K_9V_c + K_{10}$$

1.13 Meulage robotisé

1.13.1 Introduction

Le procédé d'enlèvement de matière robotisé n'est pas très utilisé dans l'industrie. Il représente seulement 5 % des ventes (Chen & Dong, 2013).

Il existe des cas dans l'industrie où le meulage conventionnel ne peut pas être appliqué, tels que le meulage de grandes pièces avec des formes complexes ou le meulage dans des endroits dont l'accès est très difficile. Dans ces circonstances, le meulage robotisé est la solution, voir Figure 1.13.



Figure 1.13 Robot monté sur une turbine
(Rafieian, Hazel, & Liu, 2014)

1.13.2 Technologie SCOMPI

À l'IREQ (Institut de Recherche Hydro-Québec), le meulage est robotisé par un robot SCOMPI (*Super COMPact robot Ireq*). C'est un robot à 6 axes qui se déplace sur un rail et qui peut être monté directement sur une turbine, voir Figure 1.14 (Hazel, Côté, Laroche, & Mongenot, 2012).

La caractéristique de ce robot est qu'il est très compact, très léger et génère une bonne puissance de meulage. Ces caractéristiques lui permettent de s'insérer facilement dans des endroits, dont l'accès difficile. Il pèse environ 35 kg et il possède une faible rigidité structurelle qui le rend sensible aux vibrations à basse fréquence (Rafieian, Liu, & Hazel, 2009).

Différentes technologies et algorithmes de calcul sont utilisés pour assurer le contrôle de l'enlèvement de matière. La surface à meuler est scannée par une caméra laser pour bien définir les trajectoires d'outil. Puisque le robot SCOMPI est flexible, le contrôle d'enlèvement de matière est difficile. Dans ce cas, le meulage se fait de façon itérative et à chaque itération le robot enlève 80 % de l'excès de matière jusqu'à arriver à la précision voulue (Hazel et al., 2012).

d'avance et de recul en appliquant une force normale à la plaque et une force tangentielle F_t tangent à la vitesse de la meule au point de contact (voir Figure 1.16) (Gagne *et al.*, 2010).

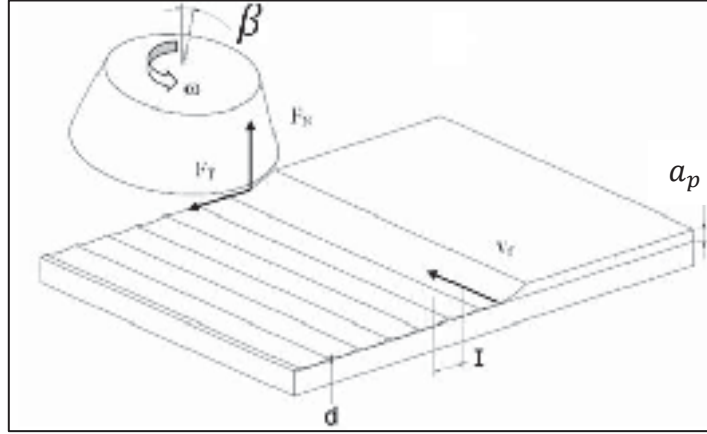


Figure 1.16 Meulage avec une meule de type boisseau (Gagne *et al.*, 2010).

La profondeur de passe a_p moyenne est liée au taux d'enlèvement de matière par la relation suivante :

$$a_p = \frac{Z_w}{v_f I} \quad (1.18)$$

Z_w est le taux d'enlèvement de matière et I l'entre-passe (voir Figure 1.16). Les ondulations de la surface meulée sont caractérisées par une hauteur de crête notée d qui est calculée par la formule suivante :

$$d = \left(R - \frac{\sqrt{4R^2 - I^2}}{2} \right) \sin \beta \approx \frac{I^2}{8R} \sin \beta \quad (1.19)$$

Où R est le rayon de la meule. On remarque ici que la hauteur de la crête dépend de l'angle d'inclinaison de la meule β et de l'entre-passe I . La hauteur de crête sera petite si l'entre-passe I ou l'angle de meulage β est petit.

Pour maintenir une puissance de meulage constante P_d , le contrôleur génère une vitesse de compensation v_z normale à la surface :

$$v_z = k_p \frac{c_z}{\mu r_c \omega} (P_m - P_d) \quad (1.20)$$

où P_m est la puissance mesurée, P_d est la puissance désirée, c_z est la compliance du robot dans la direction normale, k_p est le gain du système, ω est la vitesse de rotation de la meule et r_c est le rayon de contact de la meule, μ est le coefficient de frottement (Gagne et al., 2010).

1.13.4 Stratégie de contrôle

Une méthode itérative est préconisée pour assurer la précision de la surface désirée. Cette méthode consiste à mesurer la surface à meuler, ensuite, la comparer à la surface cible. Le robot doit enlever 80 % de l'excès de matière par rapport à la surface cible. Cette approche de mesure et meulage est répétée jusqu'à atteindre la précision voulue. Typiquement 5 à 6 itérations sont nécessaires pour atteindre une précision de 0.1 mm.

Le volume à meuler est divisée en couches fines appelées *ISO-surfaces* selon un algorithme de contrôle d'enlèvement de matière développé à l'IREQ. Une fois que les ISO-surfaces sont créées, le contrôleur crée des trajectoires de meulage pour chaque surface. Ces trajectoires de meulage sont en jaune comme le montre la Figure 1.17 (Gagne et al., 2010).

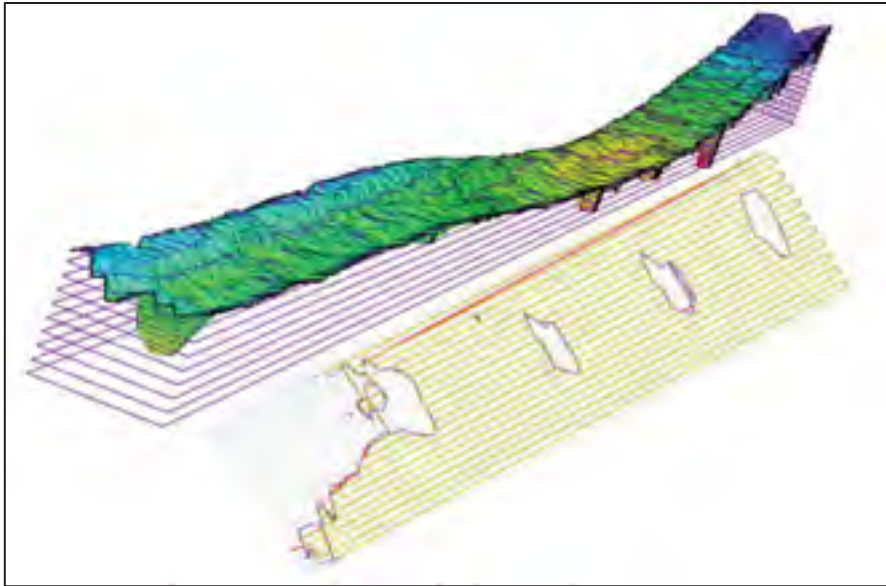


Figure 1.17 ISO-surfaces (en violet)
Trajectoires d'outil (en jaune) sur l'ISO-surface (Gagne et al., 2010)

À chaque itération, le robot enlève 80 % de l'épaisseur de surface à meuler. Si dans un endroit donné, le robot enlève une épaisseur plus importante que l'épaisseur cible, toutes les prochaines passes à cet endroit sont enlevées afin d'éviter la création d'un surplus d'enlèvements de matière. (Gagne et al., 2010). La Figure 1.18 présente l'évolution de l'erreur entre la surface cible et la surface meulée. On remarque qu'à la 6e itération l'erreur devient 0.1 mm.

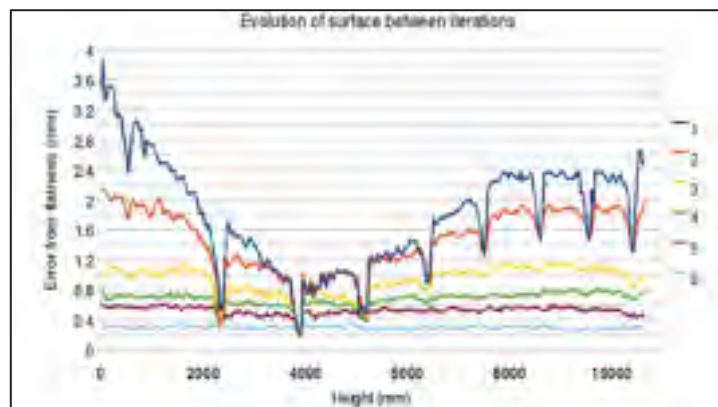


Figure 1.18 Évolution de l'erreur en fonction
du nombre d'itérations (Gagne et al., 2010)

1.13.5 Cinématique de meulage

Contrairement au meulage conventionnel où la vitesse de coupe est parallèle à la vitesse d'avance, dans le meulage robotisé, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sont perpendiculaires (voir Figure 1.19). Cette caractéristique permet de contrôler le profil de la meule jusqu'à son usure complète.

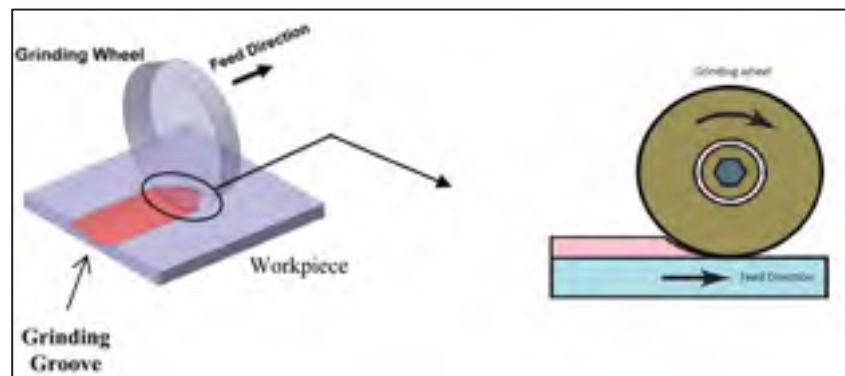


Figure 1.19 Le meulage robotisé (Figure à gauche), le meulage conventionnel (Figure à droite) (Tahvilian, Hazel, Rafieian, Liu, & Champlaud, 2016)

Les machines utilisées dans le meulage traditionnel sont très rigides et précises. Le contact entre la pièce et la meule est maintenu, ce qui assure une bonne prédiction de la quantité de la matière enlevée. Par contre, dans le meulage robotisé, le contact entre la pièce et la meule n'est pas continu. Ce type de meulage se fait par vibro-impact (*impact cutting*). Dans chaque impact, le robot enlève de la matière sous forme de copeau dans chaque impact.

1.13.6 Meulage par vibro-impact

Une observation faite par (Tahvilian et al. (2016) avec une caméra à grande vitesse, a confirmé que le meulage n'est pas continu et se fait par impact (voir Figure 1.20). Dans les recherches précédentes, le nombre d'impacts par tour est assimilé à 1. Tahvilian et al. (2016) ont constaté que le nombre d'impacts est différent de 1, et dépend de plusieurs paramètres tels que la puissance de meulage et la configuration du robot. Le nombre d'impacts est aléatoire, mais la valeur moyenne augmente avec la puissance.



Figure 1.20 Visualisation de l'impact par une caméra de grande vitesse (Tahvilian et al., 2016)

Ces impacts sont aussi visualisés par le signal de force issue de la table dynamométrique et par le signal vitesse issue du capteur de l'encodeur. La Figure 1.21 montre la variation de la vitesse de rotation de la meule et des forces de meulage en fonction du nombre de tours. On observe dans la Figure 1.21 le régime vibro-impact. Ces impacts se manifestent par un pic dans la courbe de vitesse et dans la courbe de force (Tahvilian et al., 2016).

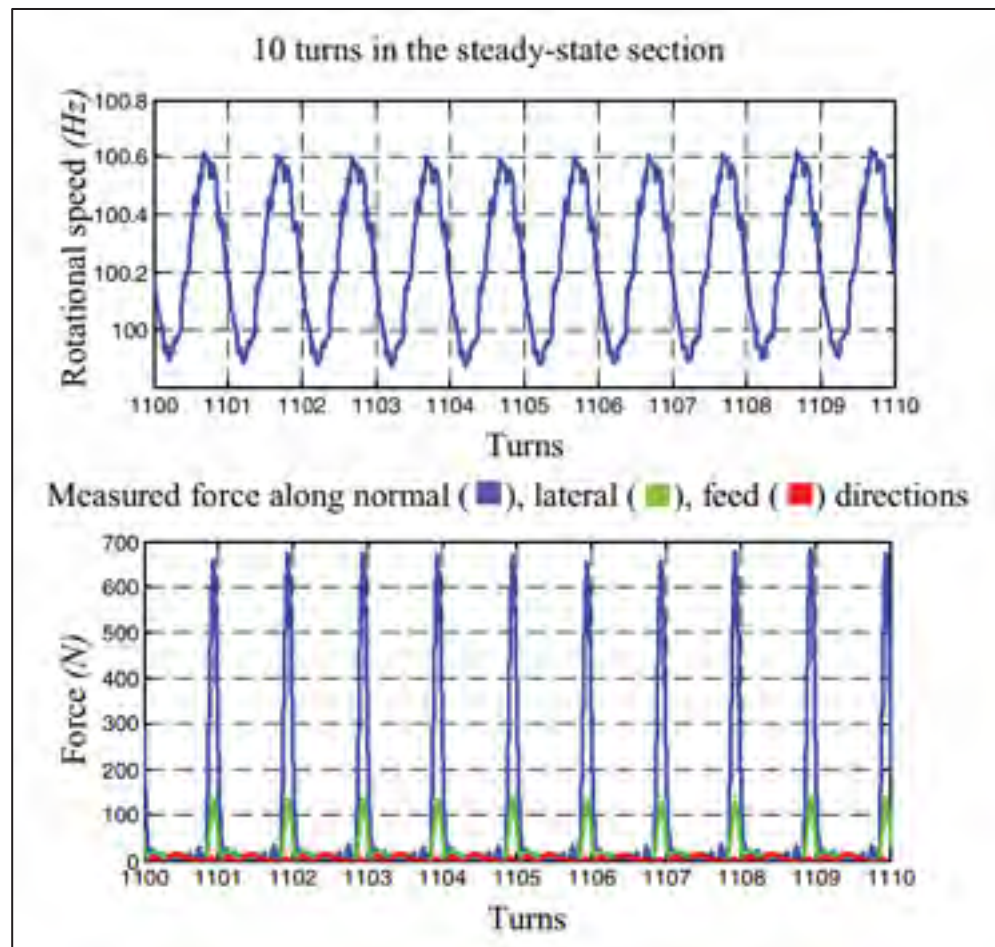


Figure 1.21 Courbe de vitesse et de force en fonction du nombre de tours (Tahvilian et al., 2016)

De nombreux essais faits par Tahvilian ont montré que le nombre d'impacts par tour est supérieur à 1 et qu'il augmente avec la puissance. Puisque le nombre d'impacts est aléatoire, Tahvilian a établi un diagramme illustrant la probabilité d'apparitions des impacts Figure 1.20. La valeur moyenne d'impact par tour est 0.75, 1.29, 1.56, 2.25 impacts par tour respectivement pour les puissances 500 W, 1000 W, 1500 W et 2000 W (Tahvilian et al., 2016).

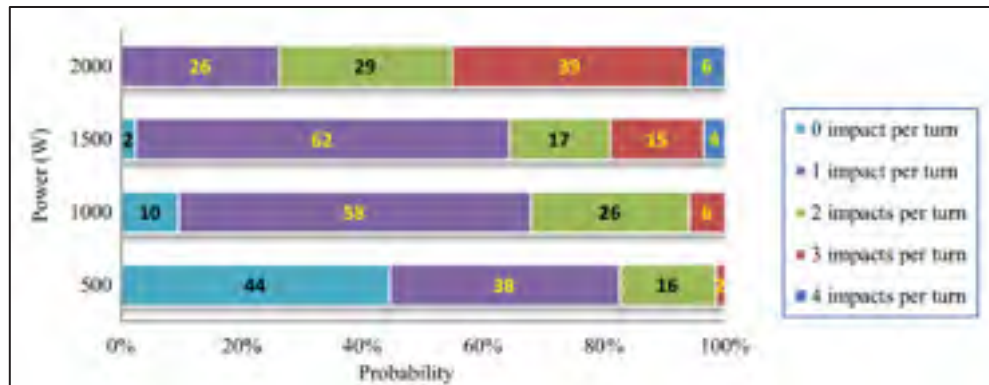


Figure 1.22 Diagramme de probabilité de nombre d'impact par tour
(Tahvilian et al., 2016)

1.13.7 Effort de meulage

Les modèles de force de meulage utilisés avec les machines conventionnelles ne sont pas bien adaptés au meulage avec robot flexible tel que le robot SCOMPI. Ceci est dû au régime de coupe par vibro-impact. Le contact entre la pièce et la meule n'est pas continu. L'enlèvement de matière dans ce cas dépend du nombre d'impacts par tour.

L'enlèvement de matière dans le meulage robotisé se fait par les grains abrasifs. Dans l'impact, plusieurs grains se mettent ensemble pour enlever de la matière. L'effet de coupe engendré par l'ensemble de grains est modélisé par une seule dent d'outil de fraisage avec un angle de coupe négative (Tahvilian et al., 2016) tel que présenté dans la Figure 1.23. À partir de cette hypothèse, un modèle de force de meulage est alors proposé par Hazel (2004) qui tient compte de la nature vibro-impact du meulage. Ce modèle proposé est inspiré du modèle de coupe donné par Altintas (2000) dans le domaine de l'usinage.

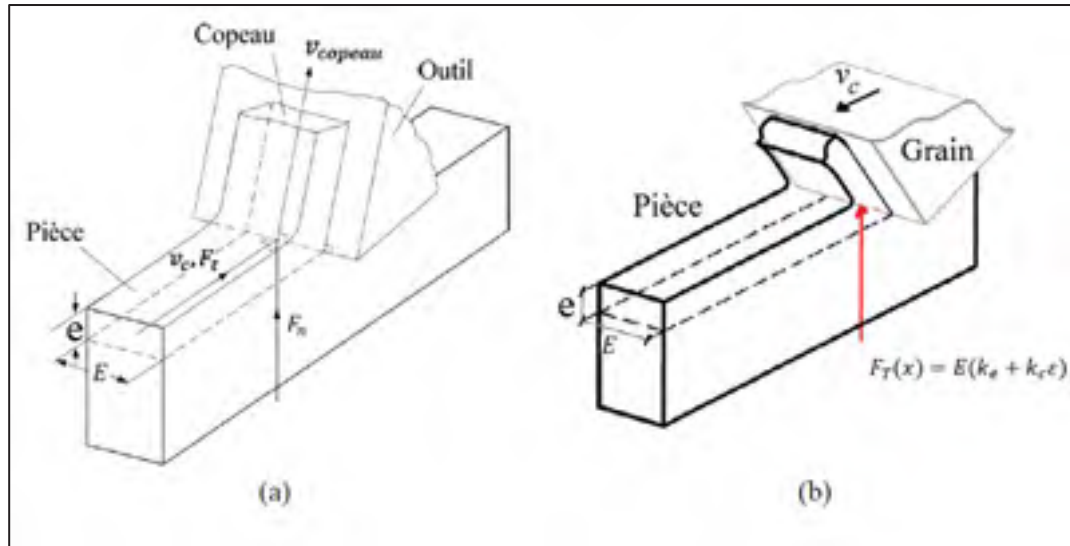


Figure 1.23 Géométrie de coupe (a) en usinage (Altintas, 2000) et (b) en meulage (Hazel, 2004)

La formule d'effort de meulage est constituée de deux parties, une partie qui représente l'effort nécessaire pour vaincre la friction et une autre partie qui représente l'effort nécessaire pour former le copeau :

$$F_T(x) = E(k_e + k_c e) \quad (1.21)$$

Les coefficients k_e et k_c sont empiriquement identifiés. Ils représentent respectivement le coefficient de force latérale associé aux forces de friction et le coefficient de coupe associé aux forces de déformation. e est l'épaisseur du copeau non déformé et E est la largeur du copeau.

Dans une étude plus approfondie, Hazel et al. (2012) ont montré que l'effort de coupe moyen pour une meule cylindrique est égal à :

$$F_T(x) = \frac{1}{2\pi R} (k_e n_c S + k_c V_{chip}) \quad (1.22)$$

Où S_{chip} est la surface du copeau non déformé, V_{chip} est le volume du copeau non déformé, n_c est le nombre d'impact par tour et R est le rayon de la meule.

1.13.8 Modèle d'oscillation pour des meules à dôme sphérique

Un modèle d'oscillation a été développé par Agnard (2013). Ce modèle se base principalement sur le modèle d'usure de Lindsay et Hahn (1971a) qui propose que le taux d'usure de la meule soit proportionnel au taux d'enlèvement de matière. Dans ce modèle, le dôme sphérique de la meule est modélisé par m disques d'épaisseur constante Δx (voir Figure 1.24). Les angles de meulage sont subdivisés aussi à n angles, passant par l'angle de meulage minimum jusqu'au maximum.

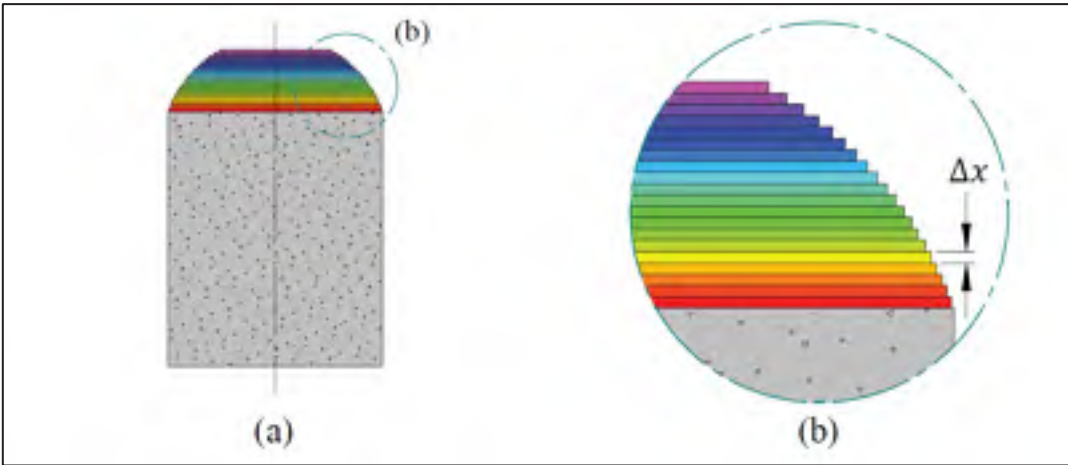


Figure 1.24 (a) Partie sphérique de la meule composée de disques d'épaisseur Δx (b) Agrandissement (Agnard, 2013)

Le modèle d'oscillation proposé par Agnard (2013) assume que le volume total de coupe par disque soit proportionnel au volume d'usure de chaque disque et il est défini par l'équation matricielle suivante :

$$[M_c] \times [M_t] = [M_u] \quad (1.23)$$

La matrice de coupe $[M_c]$ est de dimension $m \times n$. Chaque élément de la matrice de coupe représente le volume de coupe $V_{c_{i,j}}$ engendré par le disque D_i avec l'angle de meulage β_j . La matrice d'usure $[M_u]$ est un vecteur de m lignes qui contiennent le volume d'usure V_{u_i} de

chaque disque D_i . La matrice de temps $[M_t]$ est un vecteur de n lignes qui représentent le temps passé par chaque angle de meulage pour assurer un taux d'usure uniforme.

À partir des éléments de la matrice $[M_t]$, une fonction d'oscillation $t(\beta)$ est générée. Cette fonction permet de calculer le temps nécessaire à chaque angle β pour avoir une usure uniforme dans la meule. Cette fonction est présentée dans la Figure 1.25.

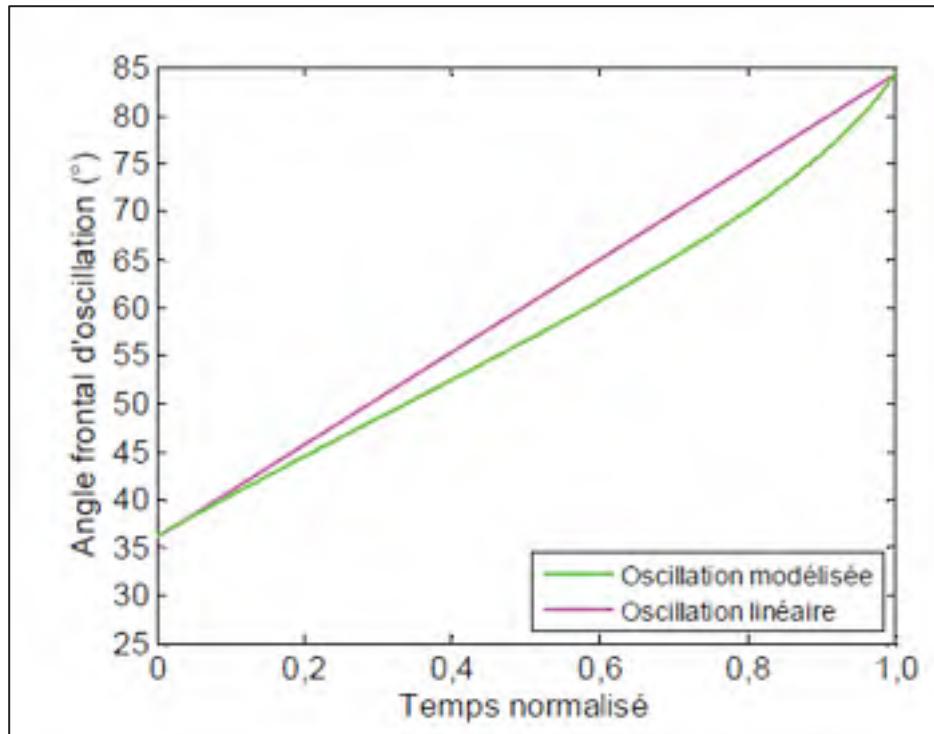


Figure 1.25 Fonction d'oscillation modélisée (Agnard, 2013)

CHAPITRE 2

ÉTUDE DE PROFILAGE D'OUTIL DE MEULAGE

2.1 Introduction

Le meulage avec un angle constant, dans la direction d'avance et de recul, engendre un profil aléatoire de la meule. Avec ce profil la surface de coupe devient sensible au changement d'angle de meulage et le taux d'enlèvement de matière varie.

L'objectif de ce projet est de développer une méthode qui assure le contrôle de l'usure de la meule afin d'améliorer le contrôle de l'enlèvement de matière pour le procédé de meulage robotisé par des meules de type boisseau.

Ce chapitre présente une étude sur le profilage d'une meule de type boisseau. La première section présente le choix du profil de la meule. Par la suite, le modèle d'usure, le modèle d'enlèvement de matière et le modèle d'oscillation sont présentés.

2.2 Choix du profil de la meule

2.2.1 Forme du profil de la meule désirée

La forme du profil de la meule a une grande influence sur le taux d'enlèvement de matière. Elle définit aussi la forme du profil de la surface à meuler. Le choix du profil de la meule est très important. Il est basé sur les résultats de la recherche d'Agnard en 2013 sur les meules embouts et adapté au meules boisseaux.

Dans les travaux d'Agnard (2013), le profil sphérique a été utilisé avec des meules de type embout, voir Figure 2.1. Le meulage effectué avec ce type de meule a donné de bons résultats au niveau du contrôle du taux d'enlèvement de matière et d'usure de la meule. La forme de l'empreinte réalisée sur la pièce à l'aide de ce type de meule est indépendante de l'angle de meulage.

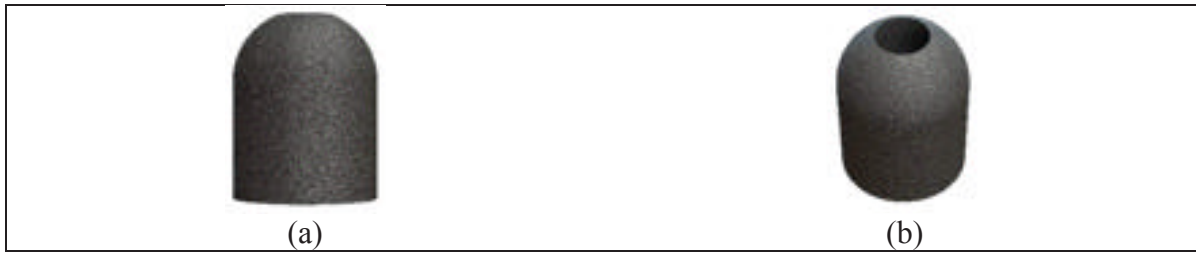


Figure 2.1 Meule de type embout (a) Vue de face (b) Vue isométrique

À partir de cette perspective, on a eu l'idée d'appliquer le profil sphérique avec des meules de type boisseau, voir Figure 2.2. Les angles de meulage utilisés avec les meules de ce type sont aux alentours de 7° à 18° . Ces angles sont très faibles par rapport aux angles de meulage utilisés avec les meules de type embout qui sont aux alentours de 25° à 85° (Agnard, 2013). Cette contrainte impose un rayon du profil de la meule supérieur au rayon du profil utilisé avec les meules de type embout.



Figure 2.2 (a) Meule neuve (b) Meule profilée avec un profil sphérique

Pour valider le choix du profil sphérique avec les meules de type boisseau, une simulation numérique de l'opération de meulage est réalisée afin d'analyser l'évolution de la forme de l'entaille sur la plaque et la forme du copeau non déformé. Dans la simulation, le contact entre la meule et la pièce est supposé continu et le meulage est réalisé avec un mouvement de berceau. La largeur de l'entaille et la profondeur de passe générées avec ce type de meule

restent constantes tout au long de l'opération de meulage (voir Figure 2.3). Cette simulation prouve que le choix du profil sphérique de la meule est le choix optimal pour bien contrôler le taux d'enlèvement de matière au cours du meulage.

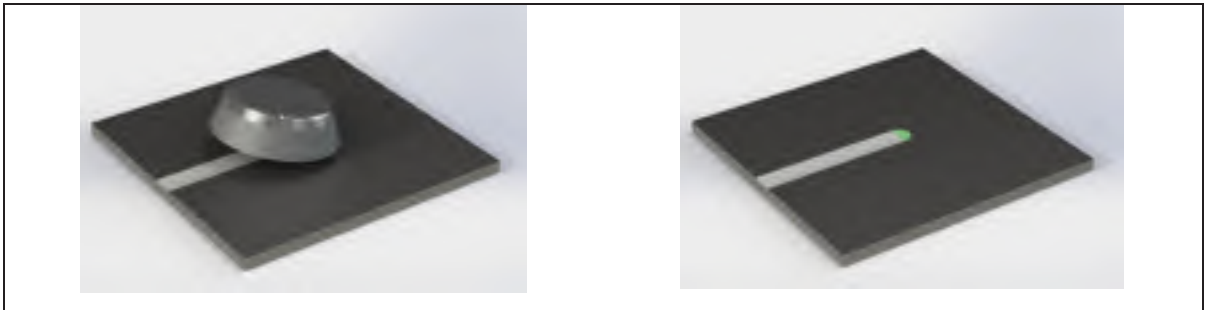


Figure 2.3 Forme de l'entaille réalisée par la meule

Dans la même simulation, une analyse du copeau non déformé est faite. Le copeau non déformé est, par définition, le volume de l'intersection entre la meule et la pièce à meuler à chaque impact. Cette analyse a montré que la forme et le volume du copeau non déformé (voir Figure 2.4) restent constants en variant l'angle de meulage. Ceci montre aussi que le profil sphérique utilisé par Agnard en 2013 fonctionne très bien avec la meule de type boisseau.

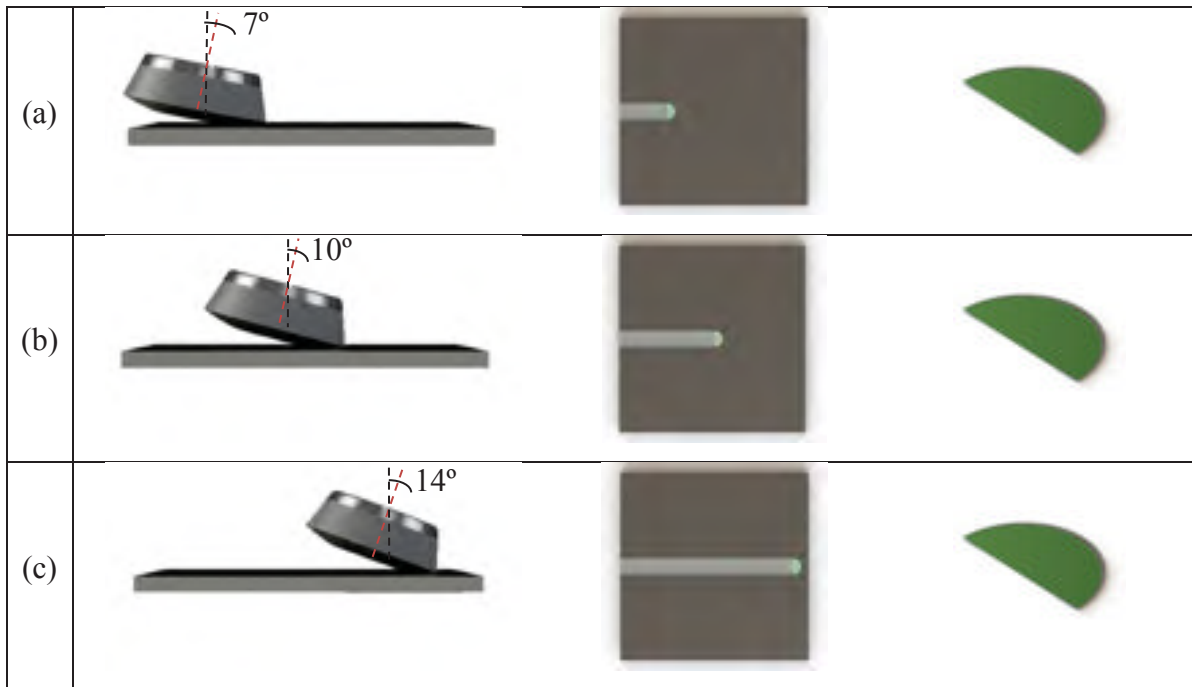


Figure 2.4 Forme du copeau non déformé avec un angle de meulage égal à (a) 7° (b) 10° (c) 14°

2.2.2 Choix du rayon du profil

La détermination du rayon du profil R_p (voir la Figure 2.2) est importante afin de bien définir la surface de coupe et les angles de meulage. Dans cette section, le rayon du profil optimal de la meule de type boisseau est déterminé. Pour ce faire, plusieurs critères entrent en jeu :

- Il faut que l'épaisseur du dôme sphérique a soit supérieure à l'épaisseur de coupe a_p multiplié par un coefficient n_a , voir Figure 2.5.
- Il faut que les angles limites d'oscillation soient bornés.
- Il faut minimiser le temps de passage d'une meule neuve à une meule complètement profilée.

Pour ce faire, un algorithme d'optimisation a été réalisé afin de choisir le bon rayon du profil. Cet algorithme cherche à minimiser la distance D (voir Figure 2.5). Autrement dit, il cherche à minimiser la quantité de matière à enlever au niveau de la meule pour passer d'une meule neuve à une meule complètement profilée tout en respectant le critère de l'épaisseur a de la

zone sphérique et le critère des angles limites d'oscillation. Le premier critère concerne l'épaisseur de la zone sphérique qui doit être supérieure à l'épaisseur de coupe a_p multiplié par un coefficient n_a . Le deuxième critère concerne les angles limites d'oscillation qui doivent être dans une plage d'angle limite critique.

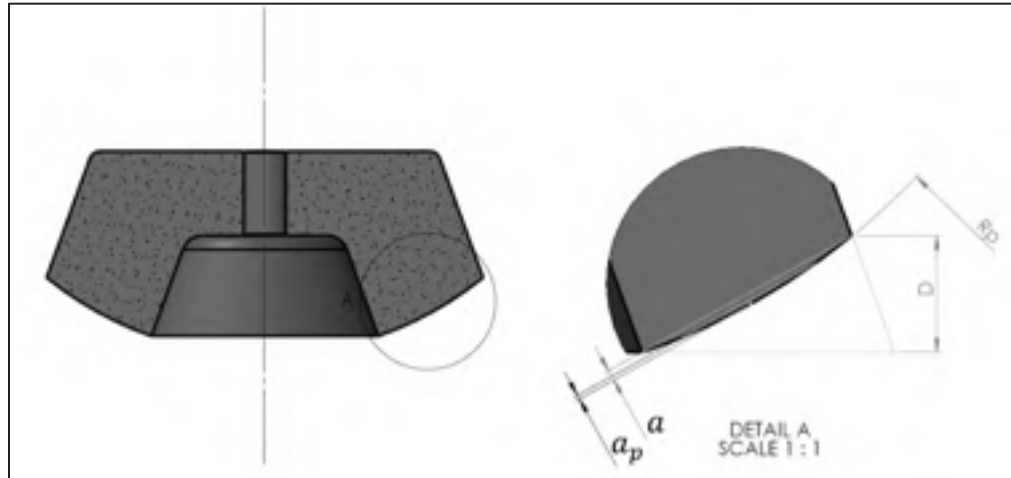


Figure 2.5 Profondeur de passe comparée à l'épaisseur de la zone sphérique

Ce problème d'optimisation est résumé par l'équation suivante :

$$\min D = f(Rp) \quad (2.1)$$

Sous contrainte de :

$$\begin{cases} a(Rp) > n_a \cdot a_p \\ \Delta\beta_{\min_critique} < \Delta\beta(Rp) < \Delta\beta_{\max_critique} \end{cases}$$

Où :

- D est l'épaisseur maximale de la matière à enlever pour profiler la meule.
- $\Delta\beta$ est l'intervalle d'angle d'oscillation de la meule.
- $\Delta\beta_{\max_critique}$ et $\Delta\beta_{\min_critique}$ sont les intervalles d'angles limite critiques *max* et *min* de la meule.

L'expression de D est donnée par la formule suivante :

$$D = \frac{D1}{\tan(\alpha_m)^{-2} + 1} \quad (2.2)$$

Avec :

$$D1 = b_1 - b_2 + \tan(\alpha_m)^{-1} \cdot \left(\sqrt{2(H + b_2) \sqrt{R_p^2 - r_{0int}^2} - (H + b_2)^2 + r_{0int}^2 + R_p^2 \tan(\alpha_m)^{-2}} - \sqrt{2(H + b_1) \sqrt{R_p^2 - r_{0int}^2} - (H + b_1)^2 + r_{0int}^2 + R_p^2 \tan(\alpha_m)^{-2}} \right) \quad (2.3)$$

Où :

- r_{0int} est le rayon interne de la meule.
- H est la hauteur de la meule.
- R_p est le rayon du profil.
- α_m est l'angle de conicité de la meule de type boisseau.
- b_1 et b_2 sont les paramètres géométriques de la meule, voir Figure 2.8.

L'expression de l'épaisseur de la zone sphérique a est donnée par la formule suivante :

$$a = R_p \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right) \right) \quad (2.4)$$

Avec :

$$\Delta\beta = \beta_{max} - \beta_{min} \quad (2.5)$$

β_{max} et β_{min} sont respectivement les angles géométriques maximum et minimum.

La Figure 2.6 représente le graphe du choix de rayon du profil de la meule. La zone délimitée par les deux traits violets représente la plage des rayons qui satisfait au premier critère de l'équation (2.1) qui est $a(Rp) > n_a a_p$. La deuxième zone délimitée par les deux traits rouges représente l'intervalle de rayon de profil de la meule qui satisfait le deuxième critère de l'équation (2.1) qui est $\Delta\beta_{min_critique} < \Delta\beta(Rp) < \Delta\beta_{max_critique}$. La zone délimitée par le carré bleu représente la plage de rayons du profil qui satisfait les deux critères.

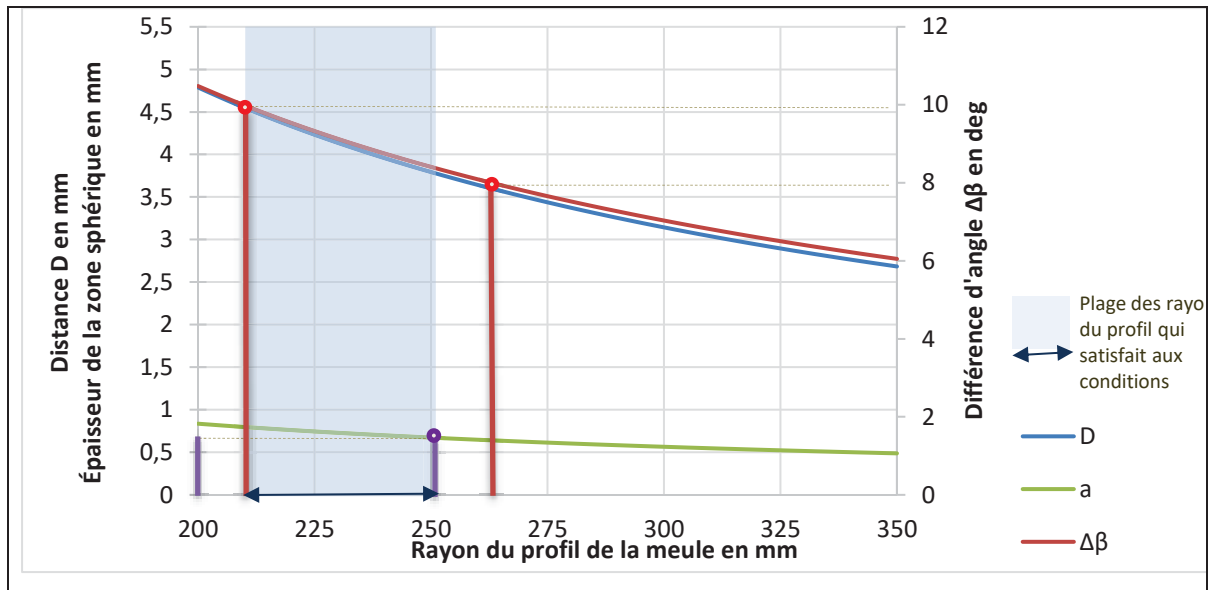


Figure 2.6 Choix du rayon de meulage

2.3 Modèle d'enlèvement de la matière

2.3.1 Surface de coupe

La détermination de la surface de coupe en meulage est essentielle pour le développement du modèle d'enlèvement de matière. Lorsqu'il y a un chevauchement des passes la surface de coupe devient tronquée. Les équations suivantes permettent de calculer la surface de coupe avec chevauchement :

$$r_1 = \sqrt{8 \cdot a_p \cdot \left(Rp - \frac{a_p}{2}\right)} \quad (2.6)$$

$$r_2 = 7 \cdot I/10 - 2\sqrt{(a_p(2Rp - a_p))/5} \quad (2.7)$$

$$dS = \sqrt{(Rp^2 - y^2)} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 - y^2\right)}}{(Rp - a_p)} \right) \cdot dy \quad (2.8)$$

$$S = \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{(Rp^2 - y^2)} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\left(\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 - y^2\right)}}{(Rp - a_p)} \right) \cdot dy \quad (2.9)$$

r_1 et r_2 sont les bornes d'intervalles d'intégration de l'élément de surface dS (voir Figure 2.7). Ces paramètres dépendent de l'entre-passe, de la profondeur de coupe et du rayon du profil de la meule.

La profondeur de passe est calculée en fonction du taux d'enlèvement de matière avec l'équation (2.10) (Boudreault, Hazel, Coté, & Ben Tanfous, 2017) :

$$a_p = \frac{Z_w}{Iv_f} - \frac{\sqrt{R_p^2 - I^2}}{2} + \frac{R_p}{2} \quad (2.10)$$

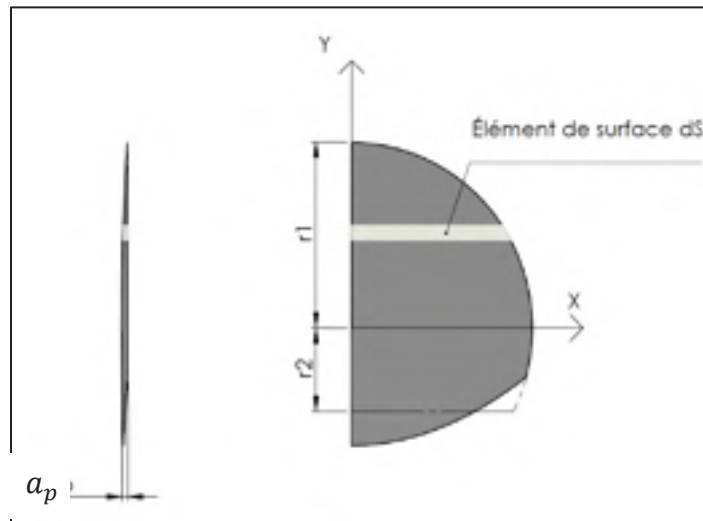


Figure 2.7 Surface de coupe

2.3.2 Modélisation de l'enlèvement de la matière

Pour des applications de meulage robotisé où le meulage est fait par vibro-impact, un modèle simple proposé par Hazel (2004) répond aux exigences de cette application. Ce modèle possède uniquement deux constantes à déterminer k_e et k_c qui sont, respectivement, le coefficient de force latérale et le coefficient de coupe. Ces coefficients sont déterminés expérimentalement.

$$P = k_e S N n_c + k_c Z_w \quad (2.11)$$

Le paramètre S est la surface du copeau non déformé qui est donné par la formule (2.9), N est le nombre de tours par minute de la meule, Z_w est le taux d'enlèvement de matière, P est la puissance de meulage et n_c est le nombre d'impact par tour.

2.4 Modèle d'usure de la meule

2.4.1 Volume d'usure

La connaissance du volume d'usure nous permet de connaître l'évolution de l'usure de la meule. Pour calculer le volume d'usure, il existe deux méthodes. La première méthode consiste à utiliser le taux d'usure multiplié par le temps de meulage, tel que défini par l'équation (2.12).

$$V_{usure} = Z_s \cdot t \quad (2.12)$$

Où Z_s est le taux d'usure de la meule et t est le temps de meulage.

Une autre méthode purement géométrique permet de calculer le volume d'usure en fonction des paramètres géométriques de la meule. Cette méthode consiste à faire une intégrale d'un élément de volume dV_{usure} qui est défini par l'équation (2.13) :

$$dV_{usure} = S_{disque} \cdot dh \quad (2.13)$$

L'élément de volume dV_{usure} est le produit de la surface de disque S_{disque} et du déplacement infinitésimal axial dh causé par l'usure de la meule.

La surface de disque S_{disque} est l'aire de la surface de disque projeté dans la face supérieure de la meule et elle est calculée à partir du théorème de Guldin par l'équation (2.14) :

$$S_{disque} = 2 \cdot \pi \cdot E_m \cdot x_g \quad (2.14)$$

x_g est la position du centroïde de l'épaisseur E_m de la meule et varie en fonction de l'usure de la meule. La coordonnée x_g est définie par l'équation (2.15) :

$$x_g = \left(H + \frac{b_1 + b_2}{2} \right) \tan(\alpha_m) \quad (2.15)$$

Avec

$$b_1 = \frac{r_{0_{ext}}}{\tan(\alpha_m)} - H_0 \quad (2.16)$$

$$b_2 = \frac{r_{0_{int}}}{\tan(\alpha_m)} - H_0 \quad (2.17)$$

Où :

- $r_{0_{ext}}$ et $r_{0_{int}}$ sont respectivement les rayons externes et internes de la meule à $t = 0$ s.
- H_0 est la hauteur de la meule à $t = 0$ s.
- H est la hauteur instantanée de la meule, voir Figure 2.8.

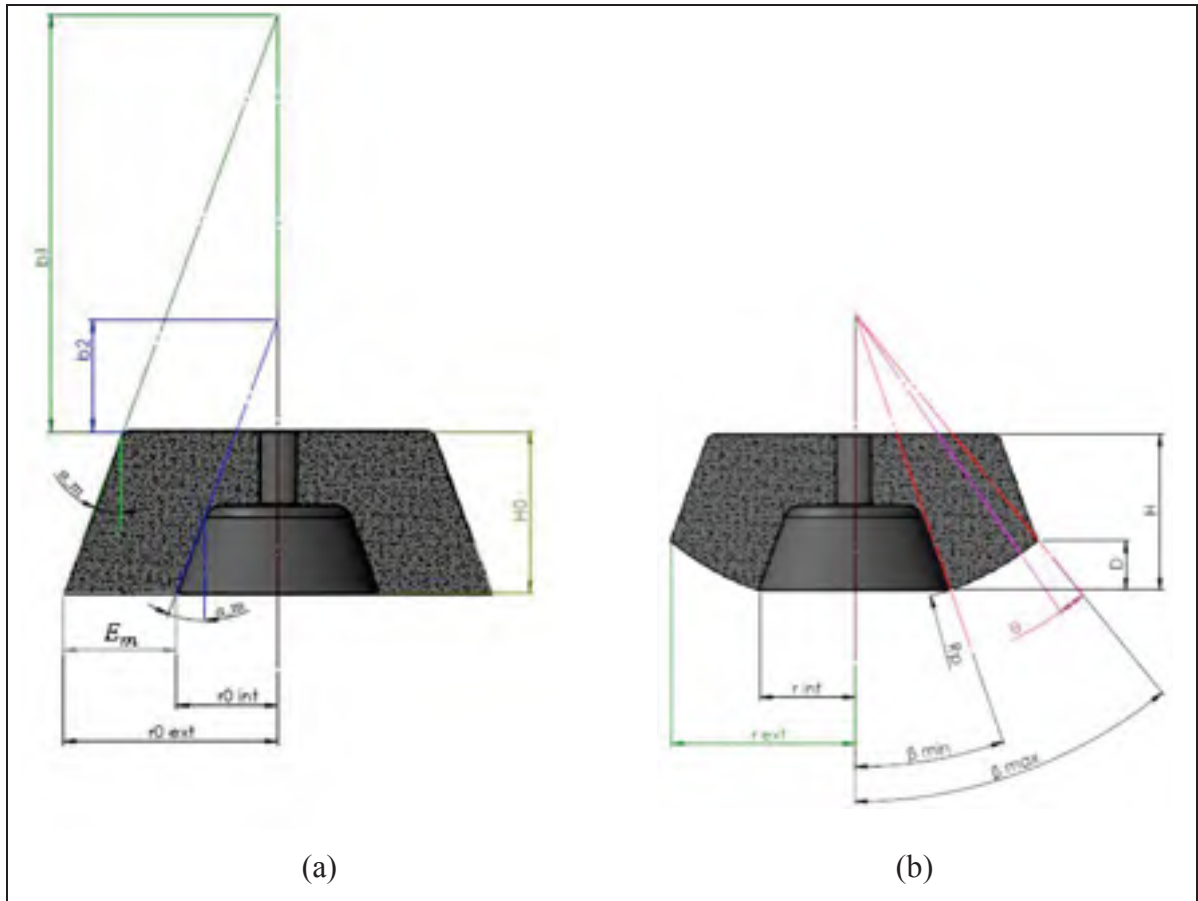


Figure 2.8 Paramètres géométriques d'une (a) meule neuve (b) meule profilée

Le volume d'usure de la meule est l'intégrale de l'élément de volume dV_{usure} entre la hauteur H instantanée de la meule et la hauteur H_0 de la meule à $t = 0$ s, voir Figure 2.9. Le calcul de l'élément de volume se fait en utilisant les équations (2.13) et (2.14). Les équations de (2.18) à (2.20) expliquent les étapes de calcul du volume d'usure.

$$V_{usure}(H) = \int_H^{H_0} dV_{usure} \quad (2.18)$$

$$V_{usure}(H) = \int_H^{H_0} 2 \cdot \pi \cdot E_m \cdot \tan(\alpha_m) \left(H + \frac{b1 + b2}{2} \right) \cdot dH \quad (2.19)$$

$$V_{usure}(H) = 2 \cdot \pi \cdot E_m \cdot \tan(\alpha_m) \left(\frac{H_0^2 - H^2}{2} + \frac{b1 + b2}{2} (H_0 - H) \right) \quad (2.20)$$

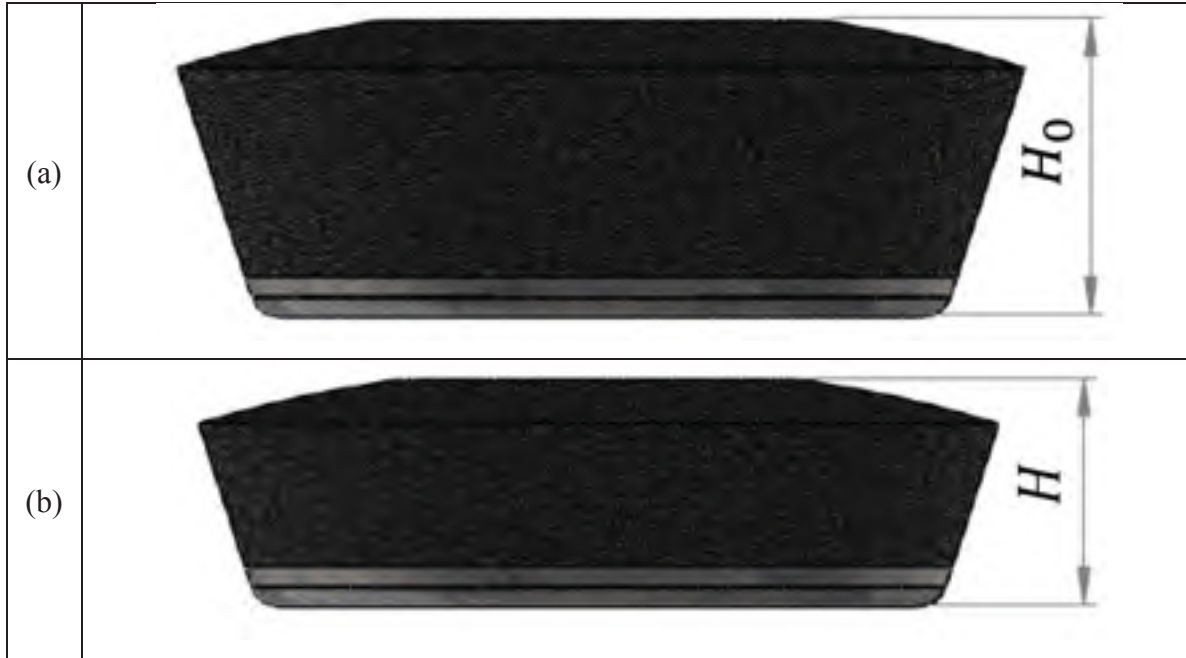


Figure 2.9 Volume d'usure de la meule
Meule non usée (b) Meule usée

Les angles limites d'oscillation de meulage dépendent principalement de la valeur de la hauteur de la meule. Habituellement pour calculer les angles de meulage, l'opérateur mesure manuellement la hauteur de la meule et ensuite il calcule les angles de meulage. Cette méthode rend le travail de meulage lent car, à chaque mesure, l'opérateur arrête le robot et, de plus, cette méthode ne tient pas compte de la variation continue de la hauteur de la meule. À partir de cette problématique, on a eu l'idée de calculer la hauteur de la meule en fonction du volume d'usure. Cette méthodologie assure un calcul automatique de la hauteur de la meule car le volume d'usure est calculé en fonction du temps de meulage avec l'équation (2.12).

Pour calculer la hauteur de la meule en fonction du volume d'usure, l'équation (2.20), qui définit le volume d'usure de la meule en fonction de caractéristiques géométriques de la meule, est utilisée. L'équation (2.20) est transformée en une équation polynomiale de second degré d'inconnue H , voir équation (2.21).

$$H^2 + (b_1 + b_2)H - \left(H_0^2 + (b_1 + b_2)H_0 + \frac{V_{usure}}{\pi E_m \tan \alpha_m} \right) = 0 \quad (2.21)$$

Pour trouver la hauteur H , il suffit de résoudre l'équation (2.21) de second degré d'inconnue H . Cette équation a deux solutions. Une solution négative est rejetée car la hauteur H doit être positive. Une deuxième solution positive donnée par l'équation (2.22) est valide. Cette équation définit la hauteur H en fonction des caractéristiques géométriques de la meule.

$$H = -\frac{H_x}{2E_m\sqrt{\pi}} \quad (2.22)$$

Avec

$$H_x = E_m\sqrt{\pi}(b_1 + b_2) - \sqrt{E_m(E_m\pi((2H_0 + b_1)^2 + b_2(4H_0 + 2b_1 + b_2)) - 4V_{usure} \tan \alpha_m^{-1})} \quad (2.23)$$

Où :

- V_{usure} est le volume d'usure qui est calculé à partir du modèle d'usure de la meule.
- H_0 est la hauteur de la meule à $t = 0$.
- b_1 et b_2 sont les paramètres de la meule.

2.4.2 Modélisation de l'usure de la meule

Certains chercheurs comme Malkin et Guo (2008) ont proposé un taux d'usure Z_s en relation exponentielle avec le taux d'enlèvement de matière comme le montre l'équation (2.24). De nombreux essais expérimentaux réalisés à l'IREQ ont montré l'efficacité de ce modèle (Agnard, 2013). Ce modèle d'usure présente un avantage car il utilise seulement le taux d'enlèvement de matière qui dépend seulement de la puissance et des paramètres de meulage.

$$Z_s = k_1 Z_w^{k_2} \quad (2.24)$$

2.5 Modèle d'oscillation

Le meulage avec oscillation est assuré par un mouvement oscillatoire de la meule comme le montre la Figure 2.10. L'angle normal de meulage varie entre l'angle minimum et l'angle maximum de meulage.

Le modèle d'oscillation assure le maintien du profil sphérique de la meule. En effet, le modèle d'oscillation exprime l'angle de meulage en fonction du temps, ceci permet de contrôler l'usure de la meule de façon à maintenir le profil sphérique pendant toute la durée de vie de la meule.

Dans cette section, les conditions nécessaires pour profiler une meule vont être énoncées. La première condition consiste à déterminer les angles de meulage dans le régime transitoire et dans le régime permanent. La deuxième condition consiste à déterminer le modèle d'oscillation de la meule.

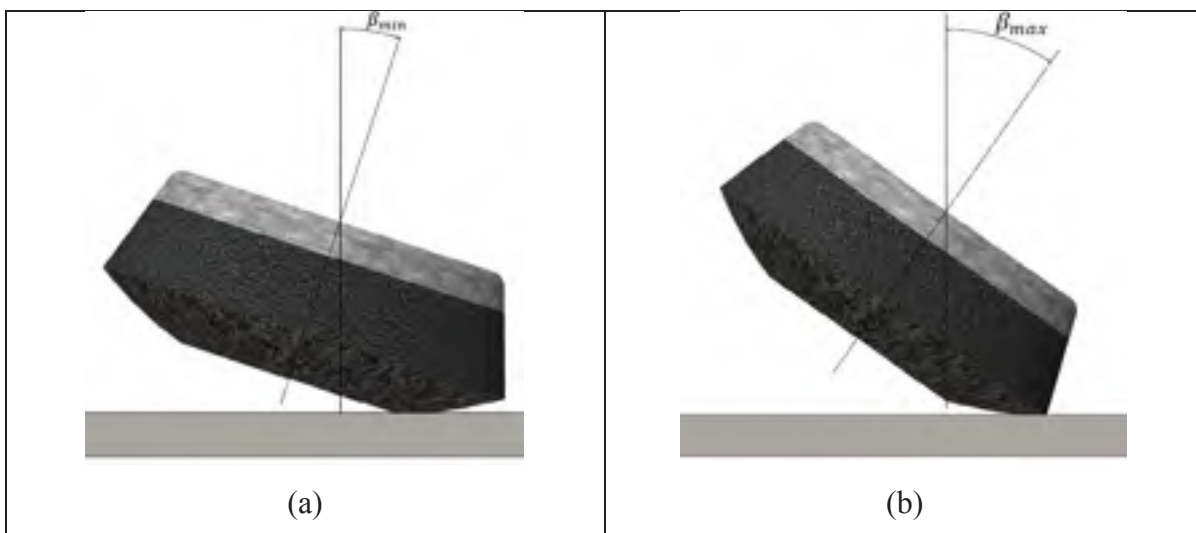


Figure 2.10 Oscillation de la meule (a) Angle minimum (b) Angle maximum

2.5.1 Angles géométriques de la meule dans le régime transitoire

Les meules de type boisseau vendues sur le marché ne sont pas profilées, comme le montre la Figure 2.11 (a) qui représente la forme de la meule neuve. Durant l'opération de maintenance, une meule neuve ne présente pas les mêmes performances qu'une meule usée. En effet, au

début, il faut meuler avec un angle de meulage fixe de façon à éliminer l'arête pointue de la meule (voir Figure 2.11 (b)) et ensuite, il faut commencer à osciller la meule en utilisant le modèle d'oscillation pour obtenir le profil sphérique (voir Figure 2.11 (c)).

La Figure 2.11 montre les étapes de profilage de la meule. Le passage d'une meule neuve à une meule complètement profilée s'appelle le régime transitoire.

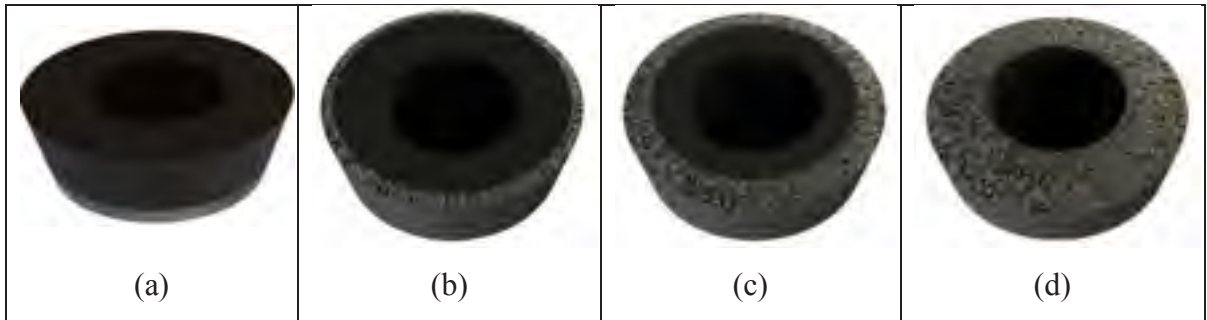


Figure 2.11 (a) Meule neuve (b) Meule légèrement usée (c) Meule avec un profil sphérique (au cours du régime transitoire) (d) Meule complètement profilée (fin du régime transitoire)

L'objectif principal du projet consiste à maintenir un profil sphérique sur toute la durée de vie de la meule. Dans cette partie, les angles de meulage en régime transitoire seront abordés. En effet, la connaissance de ces angles nous permet de bien profiler la meule dans ce régime transitoire.

L'angle géométrique minimum β_{min} et l'angle géométrique maximum β_{max} de la meule sont calculés respectivement à partir des formules trigonométriques (2.25) et (2.26).

$$\beta_{min} = \sin^{-1} \frac{r_{int}}{R_p} \quad (2.25)$$

$$\beta_{max} = \sin^{-1} \frac{r_{ext}}{R_p} \quad (2.26)$$

Avec l'usure de la meule, le rayon interne et le rayon externe de la meule varient. Il est important de calculer ces rayons en fonction des paramètres géométriques de la meule afin de bien connaître les angles de meulage dans le régime transitoire.

Le rayon interne de la meule est calculé à partir de la formule trigonométrique (2.27). Pour calculer la valeur du rayon interne, il faut mesurer la valeur E_1 qui définit l'épaisseur du disque non usé de la meule (voir Figure 2.12).

$$r_{int} = (H + b_2) \tan(\alpha_m) + E_1 \quad (2.27)$$

Avec

$$b_2 = \frac{r_{0int}}{\tan(\alpha_m)} - H_0 \quad (2.28)$$

Le rayon externe est la solution du système d'équations (2.29) en x_r . Ce système est formé par deux équations. La première définit l'équation de la droite D_1 . La deuxième définit l'équation du cercle C_1 (voir Figure 2.12). Ce système admet quatre solutions. Soit deux solutions en x_r et deux solutions en y_H . Dans ce problème, on s'intéresse seulement à la solution positive en x_r car elle définit la valeur du rayon externe de la meule.

$$\begin{cases} D_1 : y_H - \tan(\alpha_m)^{-1} x_r + b_1 = 0 \\ C_1 : x_r^2 + (y_H + d_i - H)^2 - R_p^2 = 0 \end{cases} \quad (2.29)$$

Où :

- x_r et y_H sont les coordonnées cartésiennes des équations D_1 et C_1 .
- d_i est la distance entre la surface supérieure de la meule et le centre du profil sphérique (voir Figure 2.12) et défini par l'équation (2.30).

$$d_i = \sqrt{R_p^2 - (r_{0int} + E_1)^2} \quad (2.30)$$

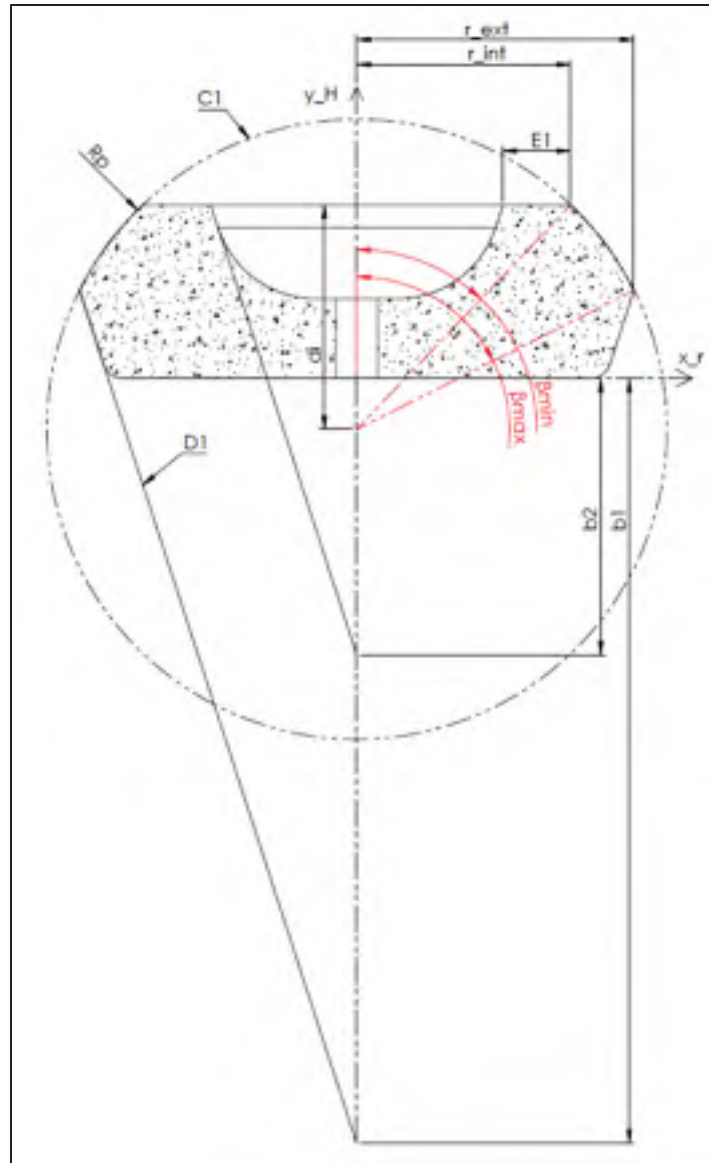


Figure 2.12 Schéma simplifié de la meule dans le régime transitoire

La solution positive de l'équation (2.29) est donnée par l'équation (2.31). Cette solution est en fonction de l'épaisseur de disque E_1 qui est mesurée directement à partir de la meule ou bien elle peut être calculée à partir du volume d'usure.

$$r_{ext} = \frac{x_2 \tan(\alpha_m)^2}{\tan(\alpha_m)^2 + 1} \quad (2.31)$$

Avec

$$x_2 = \frac{H + b_1 - \sqrt{R_p^2 - (r_{0int} + E_1)^2}}{\tan(\alpha_m)} + \left(2(H + b_1) \sqrt{R_p^2 - (r_{0int} + E_1)^2} + (r_{0int} + E_1)^2 - (H + b_1)^2 + \frac{R_p^2}{\tan(\alpha_m)^2} \right)^{0.5} \quad (2.32)$$

$$b_1 = \frac{r_{0ext}}{\tan(\alpha_m)} - H_0 \quad (2.33)$$

Au cours du meulage, l'épaisseur de disque E_1 diminue de façon continue jusqu'à ce qu'il s'annule. Le régime permanent s'établit lorsque la valeur de E_1 est nulle.

2.5.2 Angles géométriques de la meule dans le régime permanent

Une fois que le régime permanent est établi, on doit caractériser de nouveau les angles de meulage. Dans ce régime, les angles de meulage dépendent seulement de la hauteur de la meule. A partir des essais expérimentaux, nous avons constaté que le choix de la hauteur de la meule est le meilleur choix pour déterminer les angles de meulage car la mesure de cette variable est facile et plus précise.

Les angles limites géométriques β_{min} et β_{max} sont respectivement les angles géométriques minimum et maximum de la meule. Ils sont calculés à partir des formules suivantes :

$$\beta_{min} = \sin^{-1} \frac{r_{int}}{R_p} \quad (2.34)$$

$$\beta_{max} = \sin^{-1} \frac{r_{ext}}{R_p} \quad (2.35)$$

Où r_{int} et r_{ext} sont les rayons internes et externes de la meule de type boisseau profilé.

Au cours du meulage, les angles β_{min} et β_{max} varient en fonction de la hauteur de la meule. Pour déterminer les angles limites de meulage, il faut exprimer la valeur de rayon interne et externe de la meule en fonction de sa hauteur.

Le rayon interne de la meule est calculé à partir de l'équation trigonométrique (2.36) (voir Figure 2.13). Cette équation ne dépend que de la hauteur H de la meule. Les autres variables de l'équation sont constantes au cours du meulage.

$$r_{int} = (H + b_2) \tan(\alpha_m) \quad (2.36)$$

Le rayon externe de la meule est déterminé en résolvant le système d'équations (2.37). Ce système d'équations a quatre solutions. Soit deux solutions en x_r et deux solutions en y_H . La solution positive de x_r est égale au rayon externe de la meule (voir Figure 2.13).

$$\begin{cases} D_1 : y_H - \tan(\alpha_m)^{-1} x_r + b_1 = 0 \\ C_1 : x_r^2 + (y_H + d_i - H)^2 - R_p^2 = 0 \end{cases} \quad (2.37)$$

Où :

- x_r et y_H sont les coordonnées cartésiennes des équations D_1 et C_1 .
- d_i est la distance entre la surface supérieure de la meule et le centre du profil sphérique (voir Figure 2.13) et défini par l'équation (2.38).

$$d_i = \sqrt{R_p^2 - r_{0int}^2} \quad (2.38)$$

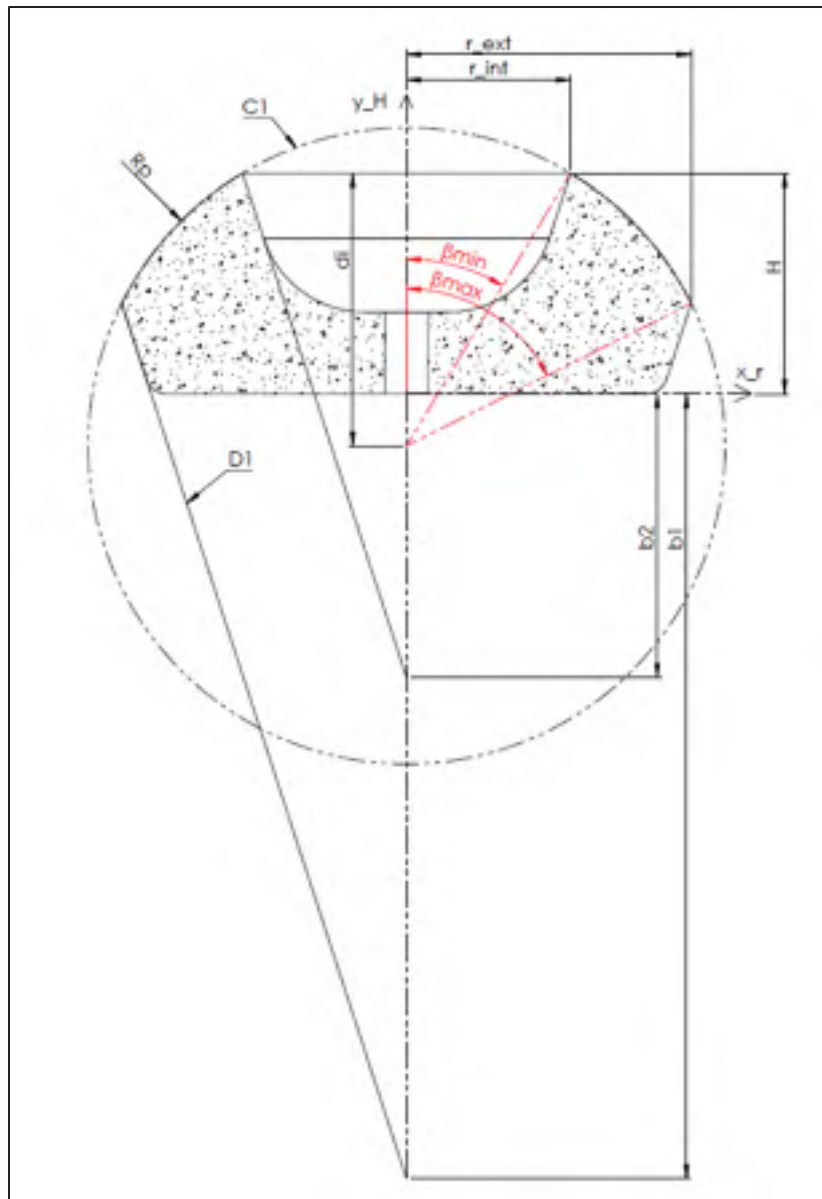


Figure 2.13 Schéma simplifié de la meule
dans le régime permanent

La solution positive de l'équation (2.37) est le rayon externe de la meule. Elle est exprimée en fonction de la hauteur de meule et de différents paramètres géométriques de la meule. Le rayon externe de la meule est donné par l'équation (2.39).

$$r_{ext} = \frac{x_1 \tan(\alpha_m)^2}{\tan(\alpha_m)^2 + 1} \quad (2.39)$$

Avec

$$x_1 = \frac{H + b_1 - \sqrt{R_p^2 - r_{0int}^2}}{\tan(\alpha_m)} + \left(2(H + b_1) \sqrt{R_p^2 - r_{0int}^2} + r_{0int}^2 - (H + b_1)^2 + \frac{R_p^2}{\tan(\alpha_m)^2} \right)^{0.5} \quad (2.40)$$

$$b_1 = \frac{r_{0ext}}{\tan(\alpha_m)} - H_0 \quad (2.41)$$

$$b_2 = \frac{r_{0int}}{\tan(\alpha_m)} - H_0 \quad (2.42)$$

2.5.3 Angles de meulage dans le régime transitoire et permanent

La détermination des angles limites d'oscillation est essentielle afin de bien meuler dans la zone sphérique de la meule. Ces angles sont déterminés à partir de la position du point de contact entre la meule et la pièce.

En meulage, le contact entre la pièce et la meule est modélisé par une surface de coupe comme le montre la Figure 2.14. Lorsqu'on meule dans la direction d'avance, l'angle maximum doit être décalé d'un angle d'immersion θ par rapport à l'angle maximum géométrique de la meule, et l'angle de meulage minimum reste égal à l'angle minimum géométrique de la meule comme le montre la Figure 2.14.

Dans le meulage dans la direction de recul, l'angle minimum doit être décalé d'un angle d'immersion θ par rapport à l'angle minimum géométrique de la meule et l'angle de meulage maximum reste égal à l'angle maximum géométrique de la meule comme le montre la Figure 2.14.

Les angles limites de meulage sont alors énoncés par les formules (2.43) jusqu'à (2.46).

Avance :

$$\beta_{Amin} = \beta_{min} \quad (2.43)$$

$$\beta_{Amax} = \beta_{max} - \theta \quad (2.44)$$

Recul :

$$\beta_{Rmin} = \beta_{min} + \theta \quad (2.45)$$

$$\beta_{Rmax} = \beta_{max} \quad (2.46)$$

Avec

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{R_p - a_p}{R_p} \right) \quad (2.47)$$

Avec

- β_{Amin} angle de meulage minimum dans la direction d'avance.
- β_{Amax} angle de meulage maximum dans la direction d'avance.
- β_{Rmin} angle de meulage minimum dans la direction de recul.
- β_{Rmax} angle de meulage maximum dans la direction de recul.
- θ est un angle d'immersion.

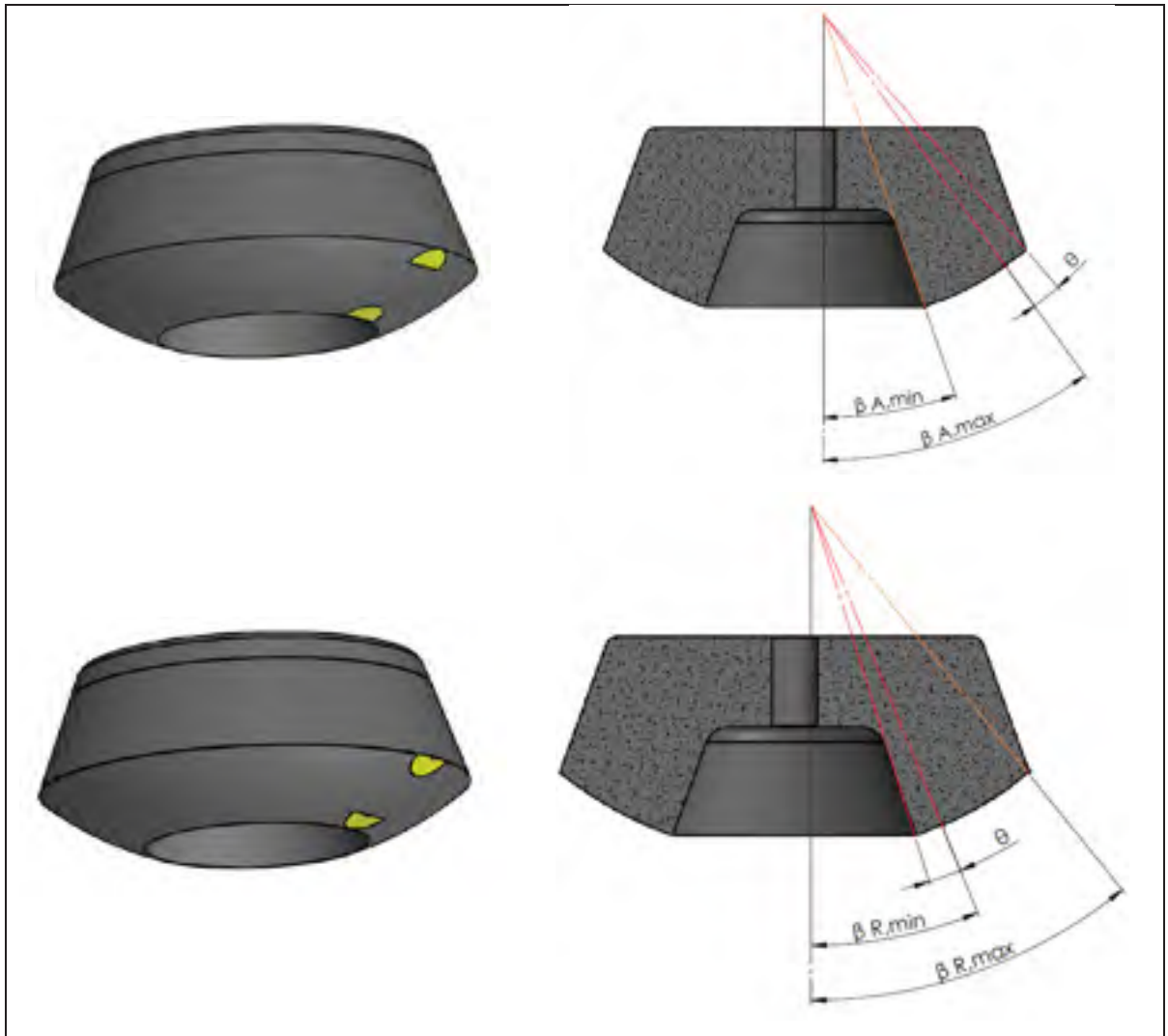


Figure 2.14 Angle limite d'oscillation

Une simulation numérique est faite afin de bien visualiser la position du point de contact suivant les directions de meulage d'avance et de recul. (voir Figure 2.15). On remarque que la position du point contact en rouge change en fonction de la direction d'avance du meulage, voir Figure 2.15.

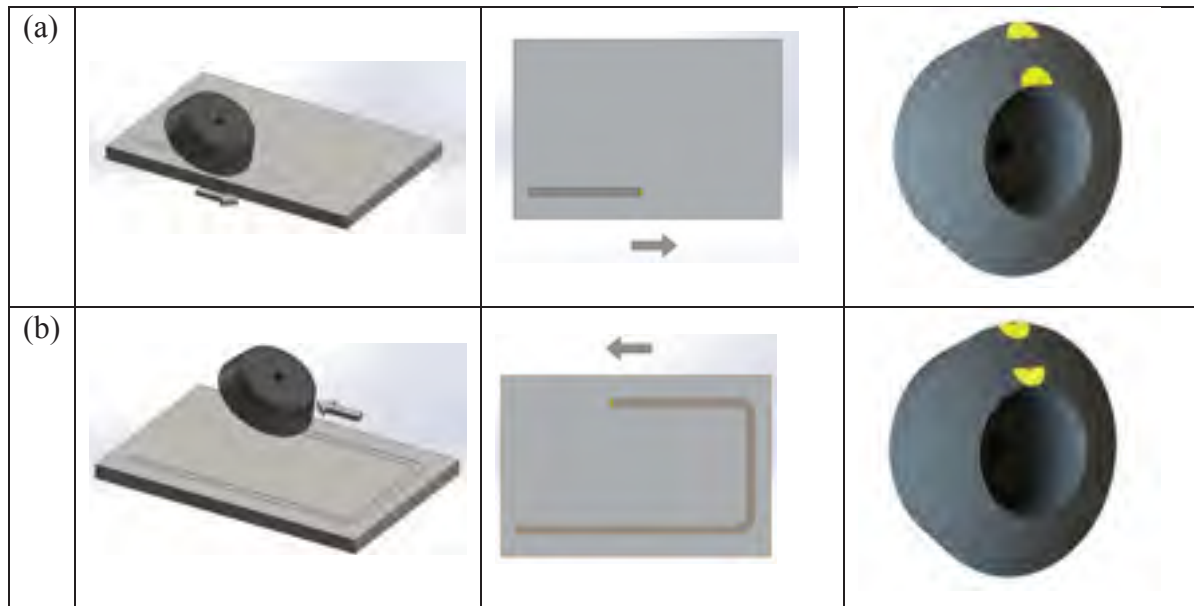


Figure 2.15 Position du point de contact (a) dans la direction d'avance
(b) dans la direction de recul

2.5.4 Correction des angles de meulage

2.5.4.1 Influence de la géométrie de copeau non déformé sur les angles de meulage.

Une analyse géométrique avec un logiciel CAO a montré que le volume du copeau non déformé est presque nul dans les extrémités. Ce volume est montré en rouge dans la Figure 2.16. Pour bien profiler la meule, il faut éviter la zone où le volume du copeau non déformé est très mince. Pour ce faire, un terme de décalage va s'ajouter aux équations (2.43) à (2.46). Ce terme permet de décaler l'angle d'immersion d'un certain pourcentage dans les extrémités de la meule (voir Figure 2.17). Il est le produit du pourcentage de décalage et de l'angle d'immersion et il est exprimé par la formule suivante.

$$\theta_c = \varepsilon \theta \quad (2.48)$$

Où :

- θ_c est l'angle de correction.
- ε est le pourcentage de décalage de l'angle d'immersion.

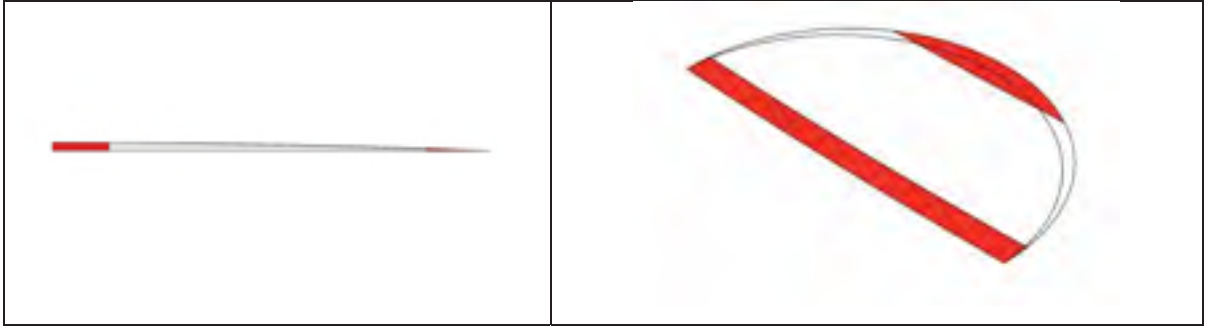


Figure 2.16 Effet de bord du copeau non déformé

Les équations (2.49) à (2.52) sont les angles de meulage corrigés avec le dépassement angulaire θ_c .

Angle de meulage corrigé à l'avance :

$$\beta_{Amin,c} = \beta_{min} - \theta_c \quad (2.49)$$

$$\beta_{Amax,c} = \beta_{max} - \theta + \theta_c \quad (2.50)$$

Angle de meulage corrigé au recul :

$$\beta_{Rmin,c} = \beta_{min} + \theta - \theta_c \quad (2.51)$$

$$\beta_{Rmax,c} = \beta_{max} + \theta_c \quad (2.52)$$

Avec :

- $\beta_{Amin,c}$ Angle de meulage minimum corrigé dans la direction d'avance.
- $\beta_{Amax,c}$ Angle de meulage maximum corrigé dans la direction d'avance.
- $\beta_{Rmin,c}$ Angle de meulage minimum corrigé dans la direction de recul.
- $\beta_{Rmax,c}$ Angle de meulage maximum corrigé dans la direction de recul.

La Figure 2.17 présente les angles de meulage corrigés.

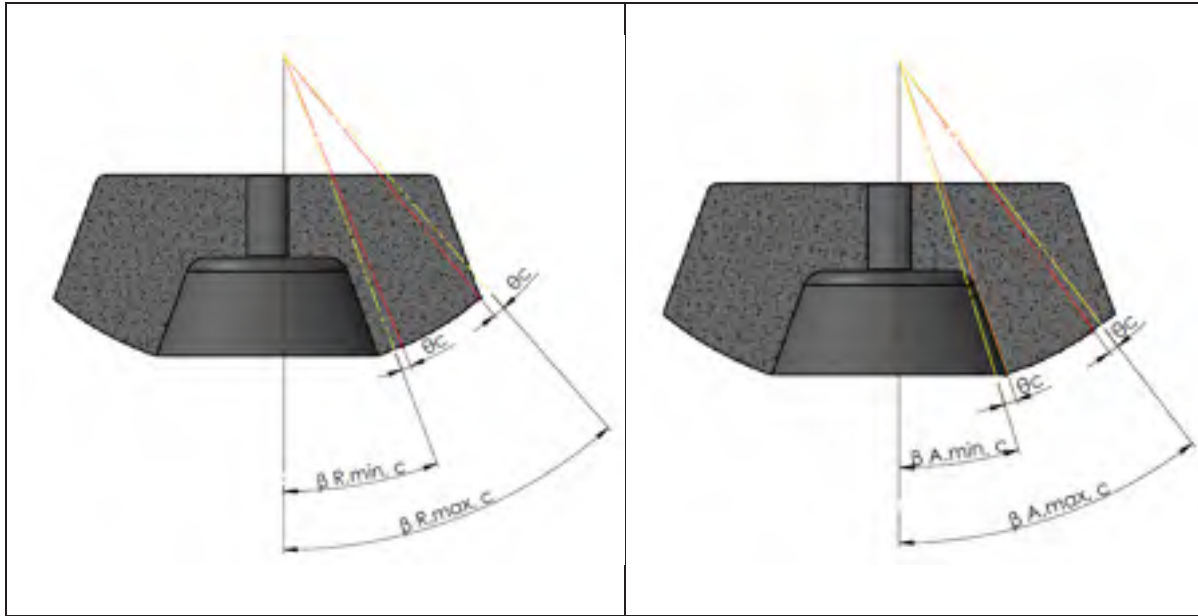


Figure 2.17 Angles de meulage corrigés

Dans un premier temps, le robot SCOMPI n'était pas programmé pour faire le décalage avec l'angle d'immersion θ . L'idée est donc d'utiliser la moyenne des angles de meulage. L'équation (2.53) représente la moyenne des équations (2.49) et (2.50). L'équation (2.54) représente aussi la moyenne des équations (2.51) et (2.52). Cette hypothèse a montré de bons résultats en termes de profilage de la meule.

$$\beta_{moy_min} = \beta_{min} + \frac{\theta}{2} - \varepsilon\theta \quad (2.53)$$

$$\beta_{moy_max} = \beta_{max} - \frac{\theta}{2} + \varepsilon\theta \quad (2.54)$$

Où :

- β_{moy_min} est l'angle moyen de meulage minimum.
- β_{moy_max} est l'angle moyen de meulage maximum

2.5.4.2 Influence de la rigidité du robot sur les angles de meulage.

SCOMPI est un robot très flexible. En meulage, pour assurer un effort normal sur la plaque à meuler, le robot se déforme élastiquement. Cette déformation élastique engendre une erreur

sur les angles de meulage. La connaissance de cette variable nous permet de compenser les angles de meulage afin de bien positionner le point de contact sur la pièce.

Le robot est modélisé par un ressort de rigidité en torsion k . Dans cette étude, la valeur de la rigidité est supposée constante, quelle que soit la configuration du robot car l'intervalle d'oscillation de la meule est faible.

Pour calculer l'effort normal appliqué sur la meule, il faut déterminer le point d'application de l'effort normal. Le point bleu de la Figure 2.18 représente le centre de masse du copeau non déformé et le point rouge représente le point de contact de la meule sur la surface de travail. λ est l'angle qui sépare le point de contact sur la surface de travail et le centre de masse du copeau non déformé (voir Figure 2.18). Dans le meulage sans chevauchement, la valeur de l'angle λ est égale à 70 % de la valeur de l'angle d'immersion.

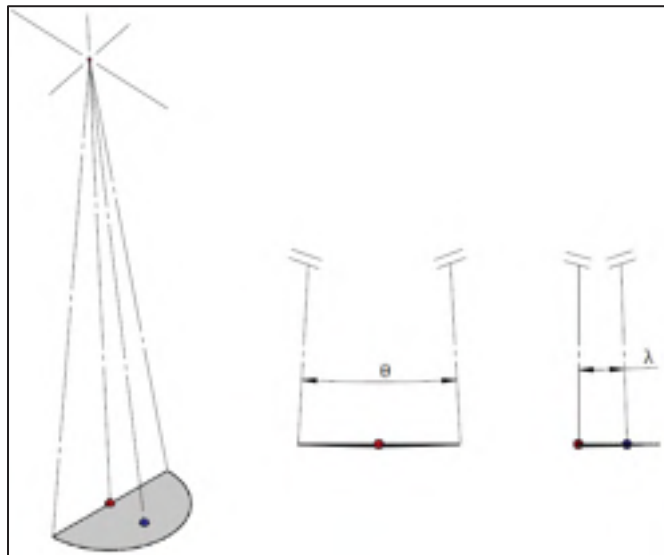


Figure 2.18 Position du centre de masse du copeau non déformé

La position de centre de masse du copeau non déformé permet de calculer la valeur du rayon effectif de meulage donné par les équations suivantes :

$$R_{EFF_A} = R_p \sin(\beta + \lambda) \quad (2.55)$$

$$R_{EFF_R} = R_p \sin(\beta - \lambda) \quad (2.56)$$

R_{EFF_A} et R_{EFF_R} sont respectivement les rayons effectifs de meulage dans la direction d'avance et dans la direction de recul.

Pour une puissance de meulage constante, l'effort normal de meulage varie selon le rayon effectif de meulage. L'effort normal F_n est calculé par l'équation (2.57).

$$F_n = F_T / \mu = P / (\mu \omega R_{EFF}) \quad (2.57)$$

R_{EFF} est le rayon effectif de meulage qui prend la valeur de R_{EFF_A} dans la direction d'avance de meulage et prend la valeur de R_{EFF_R} dans la direction de recul de meulage.

La déflexion angulaire du robot est calculée en fonction de l'effort normal appliqué sur le robot par l'équation (2.58).

$$\delta = \frac{d_r F_N}{k} + \delta_{a\ vide} \quad (2.58)$$

Où :

- d_r est la distance entre le centre du premier joint du robot et le point d'application de la force normale au robot.
- $\delta_{a\ vide}$ est la déflexion du robot à vide, c'est-à-dire avant le meulage.
- k est la rigidité du robot.

En utilisant les équations (2.57) à (2.58), on obtient la valeur de la déflexion du robot en fonction du rayon effectif.

$$\delta = \frac{d_r P}{\mu \omega k R_{EFF}} + \delta_{a\ vide} \quad (2.59)$$

Où :

- μ est le coefficient du frottement.

- ω est la vitesse de rotation de la meule.

La valeur de la déflexion donnée par l'équation (2.59) va servir à compenser l'erreur angulaire due à la déformation élastique du robot en meulage.

2.5.5 Conception d'un logiciel pour le calcul des angles de meulage

Un logiciel a été développé sous Matlab afin de calculer les angles de meulage dans le régime transitoire et dans le régime permanent en fonction de l'usure de la meule. La Figure 2.19 présente l'interface graphique du logiciel. Les paramètres d'entrées sont affichés dans la fenêtre F1. Ils sont utilisés pour calculer les paramètres géométriques de la meule et les angles de meulage qui sont présentés respectivement dans les fenêtres F2 et F3.

Calcul des paramètres de meulage

Variables d'entrees

α_m	18	I	6
$r_{0,ab}$	38.62234	a_p	0.23
$r_{0,ext}$	77.01594	N	8000
H_0	52	μ	0.3
R_p	250	P	1900
E_m	38.52	ε	0.35
$1/k$	0.0025115	$\delta_{à\ vide}$	-0.006271
θ/λ	0.7		

Selection

Parametre géométrique de meulage

β_{min}	8.096814
β_{max}	17.257961
V_{usure}	1.351966e+05
$H(V_{usure})$	41.500000

Angle de meulage

En régime transitoire

$\beta_{Amax,c}$	14.762462	$\beta_{Rmax,c}$	17.260651
$\beta_{Amin,c}$	10.387547	$\beta_{Rmin,c}$	12.885136
$\beta_{moy,max}$	16.011257		
$\beta_{moy,min}$	11.636341		

Calcul

En régime permanent

$\beta_{Amax,c}$	14.461968	$\beta_{Rmax,c}$	16.941477
$\beta_{Amin,c}$	7.678492	$\beta_{Rmin,c}$	9.615973
$\beta_{moy,max}$	15.701723		
$\beta_{moy,min}$	8.347232		

Calcul

E_s 15

H 41.5

Figure 2.19 Interface graphique du logiciel du calcul des angles de meulage

2.5.6 Fonction d'oscillation

L'objectif du modèle d'oscillation est de maintenir un profil sphérique de la meule de type boisseau constant au cours de l'opération de meulage. Pour ce faire, il faut déterminer, dans un sens infinitésimal, le temps nécessaire qu'il faut garder à chaque angle de meulage pour uniformiser l'usure de la meule et maintenir un rayon de profil constant. Dans cette étude, le taux d'usure local est supposé égal au taux d'usure globale.

$$\frac{dV_{u,local}}{dt} = Z_{s,local} = Z_{s,global} = constant \quad (2.60)$$

Où :

- $V_{u,local}$ est le volume d'usure locale.
- $Z_{s,local}$ est le taux d'usure locale.
- $Z_{s,global}$ est le taux d'usure globale (voir Figure 2.20).

L'élément de volume d'usure local est présenté par la formule suivante :

$$dV_{u,local} = 2\pi r \cdot dh \cdot dr \quad (2.61)$$

Où :

- r est le rayon du point de contact.
- dh est le déplacement infinitésimal de la hauteur de la meule dû à l'usure.

Le taux d'usure peut être défini par la formule suivante :

$$Z_{s,global} = \frac{V_{usure}}{T} \quad (2.62)$$

Avec

$$V_{usure} = S_{projetée} \cdot dh \quad (2.63)$$

$$S_{projetée} = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2) \quad (2.64)$$

Où :

- V_{usure} est le volume d'usure.
- $S_{projetée}$ est l'aire de la surface sphérique projetée sur la face supérieure de la meule.
- T est la période d'oscillation.

En utilisant les formules (2.60) et (2.62), l'équation différentielle (2.65) (Boudreault et al., 2017) est dégagé :

$$Z_{s,global} \cdot dt = dV_{u,local} \quad (2.65)$$

$$\frac{\pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}{T} \cdot dt = 2\pi r \cdot dr \quad (2.66)$$

$$\int_0^t \frac{(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}{T} dt = \int_{r_{int}}^r 2r \cdot dr \quad (2.67)$$

$$r = \sqrt{\frac{(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}{T}t + r_{int}^2} \quad (2.68)$$

Puisque

$$\beta = \sin^{-1} \frac{r}{R_p} \quad (2.69)$$

On peut calculer donc l'angle de meulage en fonction du temps avec l'équation (2.70).

$$\beta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{\frac{(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}{T}t + r_{int}^2}}{R_p} \quad (2.70)$$

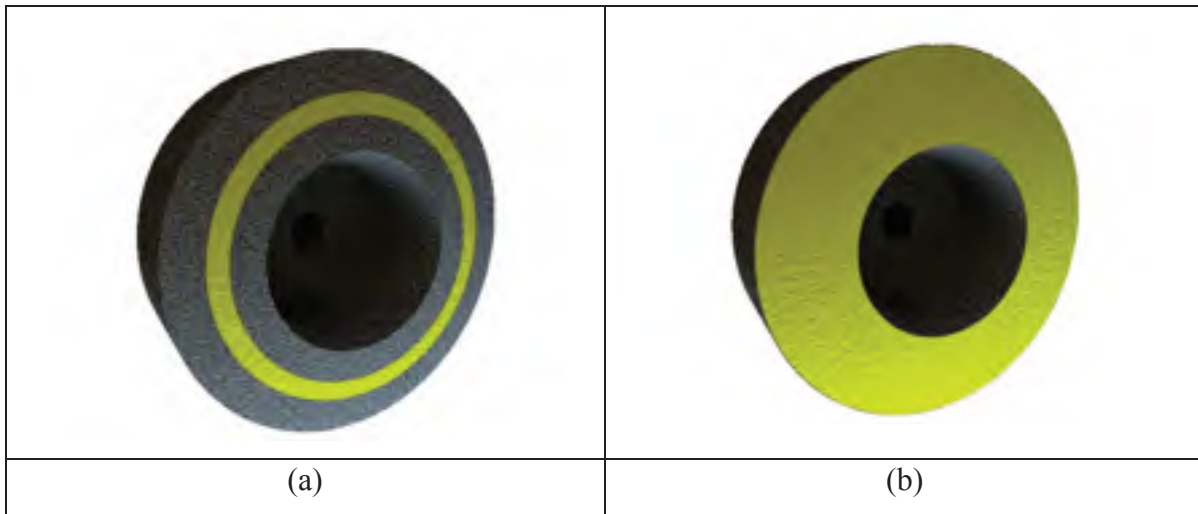


Figure 2.20 (a) Volume d'usure local (b) Volume d'usure global

La Figure 2.21 montre l'évolution de l'angle de meulage β en fonction du temps de meulage.

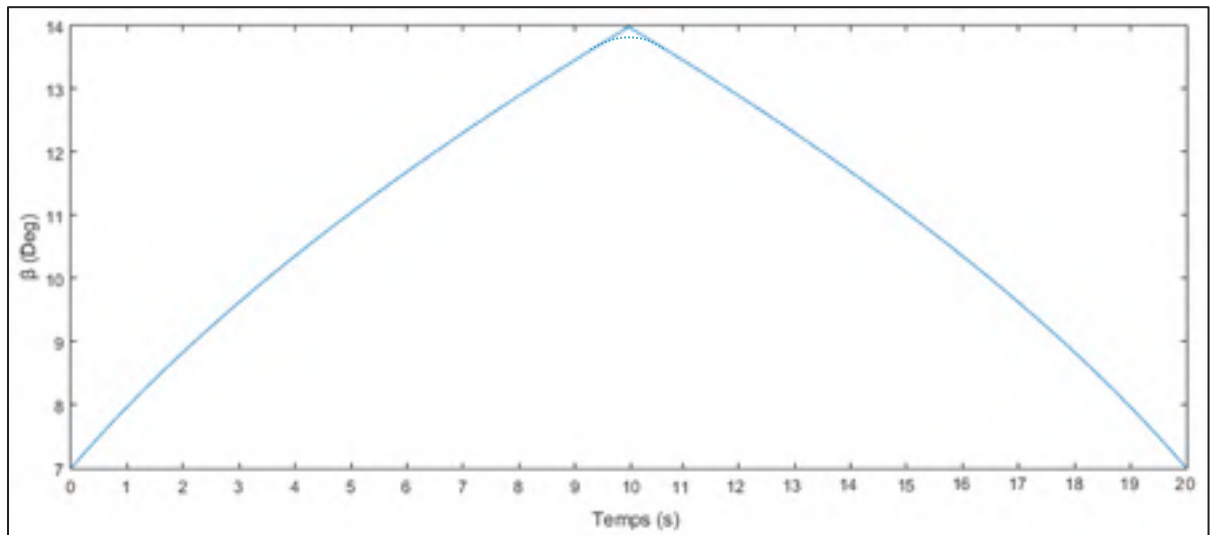


Figure 2.21 Angle de meulage en fonction du temps de meulage

CHAPITRE 3

SYSTEME DE PROFILAGE DE MEULE ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Introduction

Le profil sphérique de la meule de type boisseau n'est pas une forme standard. Pour réaliser ce profil, plusieurs solutions mécaniques ont été élaborées. La première section de ce chapitre présente les différentes solutions qui peuvent être réalisées pour effectuer le profilage de la meule. La deuxième section de ce chapitre présente les différents essais expérimentaux.

3.2 Taillage de la meule

3.2.1 Première solution – utilisation d'un mécanisme de profilage manuel de meule

Dans cette solution, le taillage de la meule se fait manuellement. Cette solution est adaptée par Agnard, 2013. Elle a montré de bons résultats avec les meules de type embout. Dans le présent projet, le profilage doit être fait pour les meules de type boisseau, donc des modifications sont faites dans la maquette pour qu'elle puisse profiler les meules de type boisseau (voir Figure 3.1). L'inconvénient principal de cette solution se réside dans la lenteur de l'opération de taillage qui doit être faite manuellement.

Cette solution n'est pas adoptée dans ce projet car l'opération de taillage de la meule est très lente et la fabrication de la maquette est très coûteuse. De plus l'opération de taillage laisse la meule dans un état où les abrasifs sont émoussés.

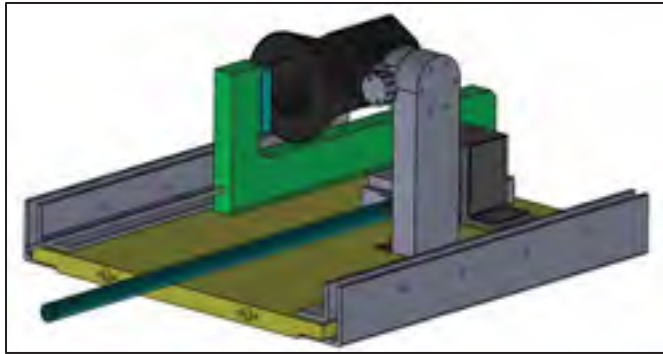


Figure 3.1 Assemblage d'un mécanisme de profilage manuel de meule

3.2.2 Deuxième solution – utilisation d'une machine CNC

Dans cette solution, une machine CNC est utilisée pour faire le taillage de la meule (voir Figure 3.2). L'inconvénient principal est que l'opération de taillage de la meule prend beaucoup de temps et utilise beaucoup d'outils de dressage pour profiler une meule. Il faut constamment calibrer la position de l'arête de coupe de l'outil de dressage, car elle s'use rapidement.

Cette solution a été utilisée au début du projet mais comme elle est très lente, nous sommes passés à la troisième solution.



Figure 3.2 Profilage d'une meule de type boisseau à l'aide d'une CNC

3.2.3 Troisième solution – taillage sur le robot SCOMPI

Cette solution consiste à utiliser le robot SCOMPI et la plaque à meuler afin de profiler la meule. Cette méthode de profilage utilise le modèle d'oscillation pour assurer le profilage de la meule. L'avantage principal de cette solution est que le taillage de la meule se fait à l'aide du robot au cours du meulage ce qui permet de gagner beaucoup de temps.

Cette solution a été adoptée tout au long du projet car elle est la plus rapide et utilise seulement le robot. Les détails de cette méthode sont présentés dans la section 3.3.2 de ce chapitre.

3.3 Essais expérimentaux

3.3.1 Méthodologie

La troisième solution énoncée dans la section 3.2.3 est adoptée pour profiler la meule de type boisseau. Les essais expérimentaux réalisés dans ce projet sont divisés en deux parties :

- La première partie consiste à valider le modèle d'oscillation. Le meulage est réalisé à l'aide du plan d'expérience donné par le Tableau 3-1. Le profil de la meule est numérisé avec un scanneur HandyScan (voir Figure 3.3). La numérisation du profil de la meule est réalisée à chaque deux couches de meulage afin de valider le maintien du profil sphérique de la meule.
- La deuxième partie des essais consiste à valider le modèle d'enlèvement de matière et d'usure de la meule avec une meule de type boisseau en dôme sphérique. Le meulage est fait avec le plan d'expérience donné au Tableau 3-2.



Figure 3.3 HandyScan

Les paramètres de distance entre les passes et de vitesse d'avance ainsi que la vitesse de rotation de la meule sont maintenus constants tout au long des essais. La plaque de meulage est en Acier 1045 et a une dimension 304.8×304.8×25 mm. Chaque essai de meulage est répété deux fois.

Tableau 3-1 Plan d'expérience pour les essais de profilage

Paramètres	Valeurs
Puissance	1900 W
Distance entre les passes	6 mm
Vitesse d'avance	80 mm/s
Vitesse de rotation	6000 RPM

Tableau 3-2 Plan d'expérience pour les essais de validation du modèle d'enlèvement de matière et d'usure de la meule

Paramètres	Valeurs
Puissance	1600 W – 1900 W – 2200 W
Distance entre les passes	6 mm
Vitesse d'avance	80 mm/s

Le coefficient ε qui apparaît dans les formules (2.53) et (2.54) permet de corriger la forme du profil sphérique dans les extrémités de la meule. Ce coefficient est déterminé par la méthode essai-erreur. L'organigramme présenté dans la Figure 3.4 permet de comprendre la procédure de détermination de ce coefficient.

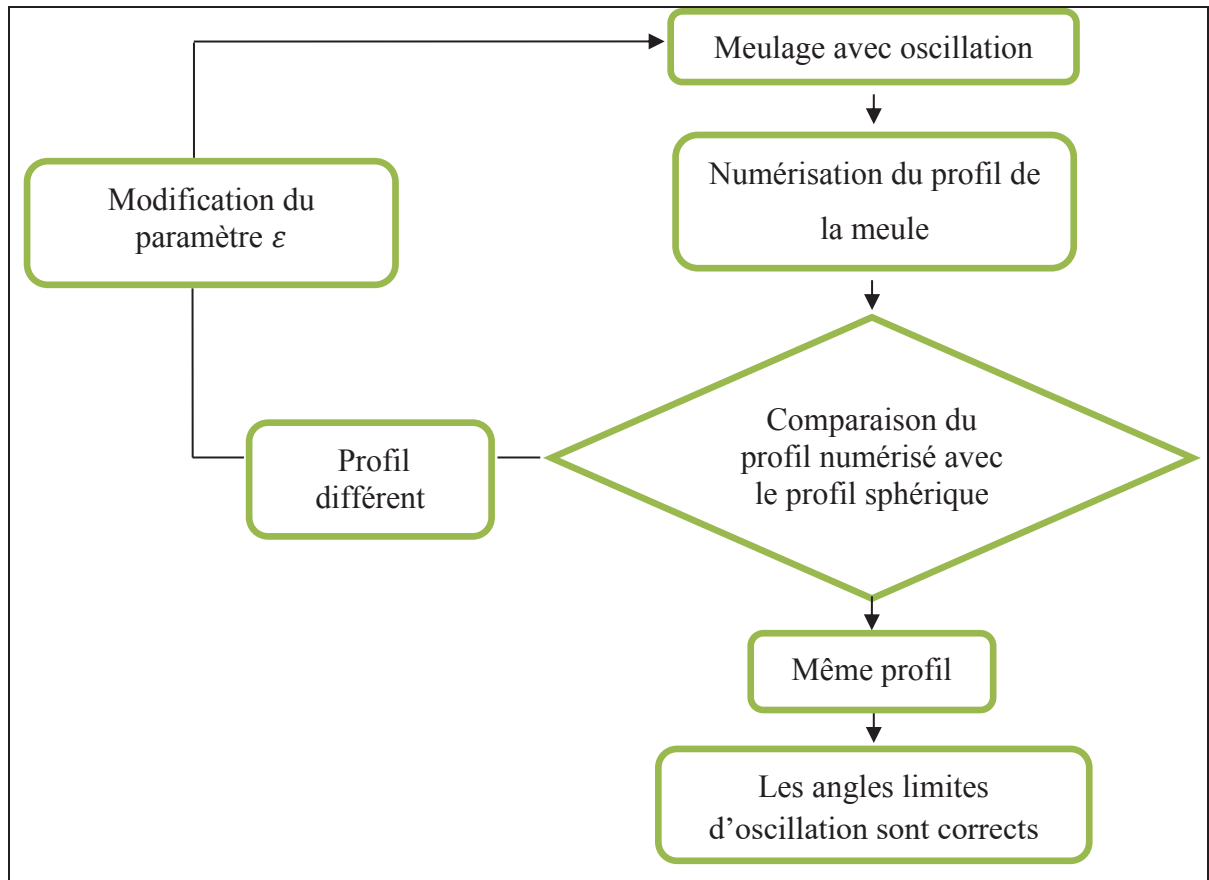


Figure 3.4 Méthode de choix du coefficient ε

3.3.2 Profilage de la meule

Plusieurs essais expérimentaux sont menés pour valider l'efficacité du modèle d'oscillation. Le meulage est réalisé avec une meule de type boisseau sur une plaque en Acier 1045. Pour assurer le profilage de la meule, le meulage est effectué avec la fonction d'oscillation et les angles de meulage énoncés dans le chapitre 2.

Pour passer d'une meule neuve à une meule complètement profilée, il faut passer nécessairement par le régime transitoire. Dans ce régime, il est nécessaire de maintenir la forme sphérique du profil de la meule afin d'assurer une surface de coupe indépendante de l'angle de meulage. Le deuxième régime est le régime permanent dans lequel la meule devient

complètement profilée. L'usure de la meule se traduit dans ce cas par la diminution de sa hauteur.

Un scanner HandyScan est utilisé pour numériser le profil de la meule. L'analyse du profil de la meule est réalisée à l'aide du logiciel Polyworks. Pour ce faire, le nuage de point du profil de la meule est sélectionné comme le montre la Figure 3.5 (a). Avec le module Best fit, Polyworks cherche la meilleure sphère qui minimise l'erreur entre la sphère et le nuage de point. La Figure 3.5 (b) montre la forme de la sphère qui épouse la forme du profil de la meule.

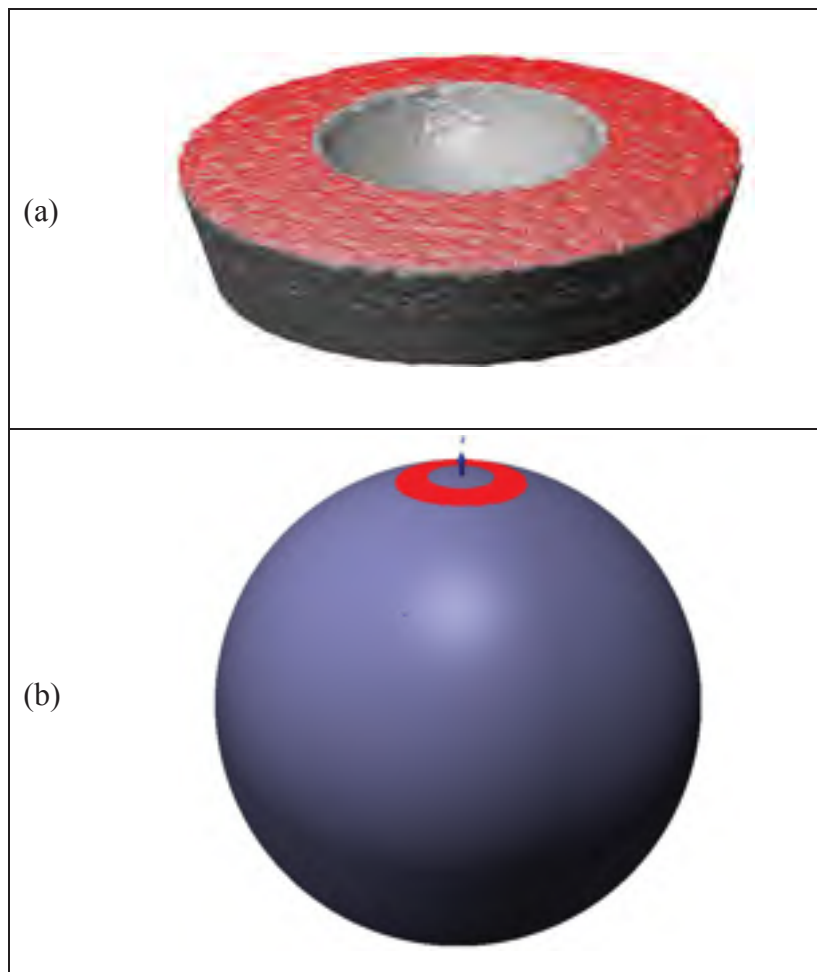


Figure 3.5 (a) Nuage de points du profil de la meule
(b) Image de la sphère qui passe par le nuage du point du profil

3.3.2.1 Régime transitoire

Dans le régime transitoire, le meulage se fait avec les angles limites d'oscillation calculés dans la section 2.5.4. Ces angles sont fonction de l'usure de la meule.

La Figure 3.6 montre la forme du profil sphérique dans le régime transitoire.

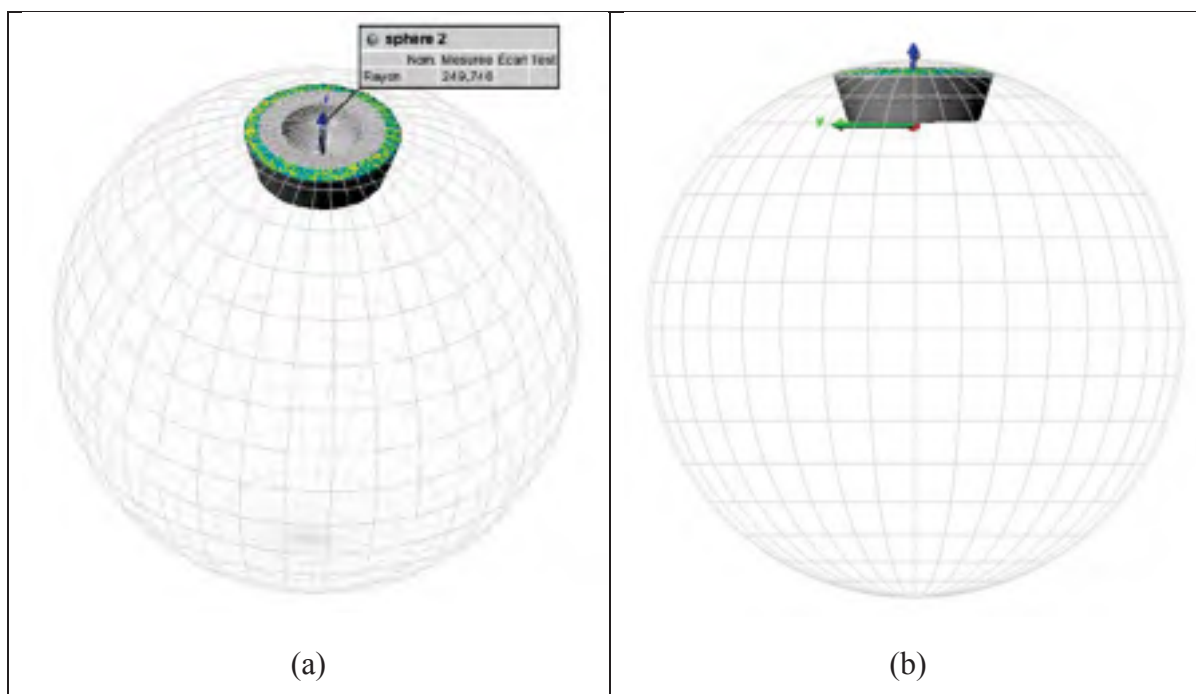


Figure 3.6 Profil sphérique de la meule dans le régime transitoire
(a) vue isométrique (b) vue de face

La Figure 3.7 montre l'évolution du rayon du profil en fonction de l'usure de la meule. L'erreur maximum entre le rayon du profil mesuré et le rayon du profil cible est de 4 %. Cette erreur est considérée comme acceptable. D'une part, parce que le rayon du profil de la meule est relativement grand et d'autre part, parce que la stratégie de contrôle d'enlèvement de matière est itérative. À chaque itération, le robot enlève 80 % de l'épaisseur de matière cible à enlever jusqu'à arriver au fini de surface voulue. Donc cette erreur peut être facilement compensée avec cette stratégie de contrôle.

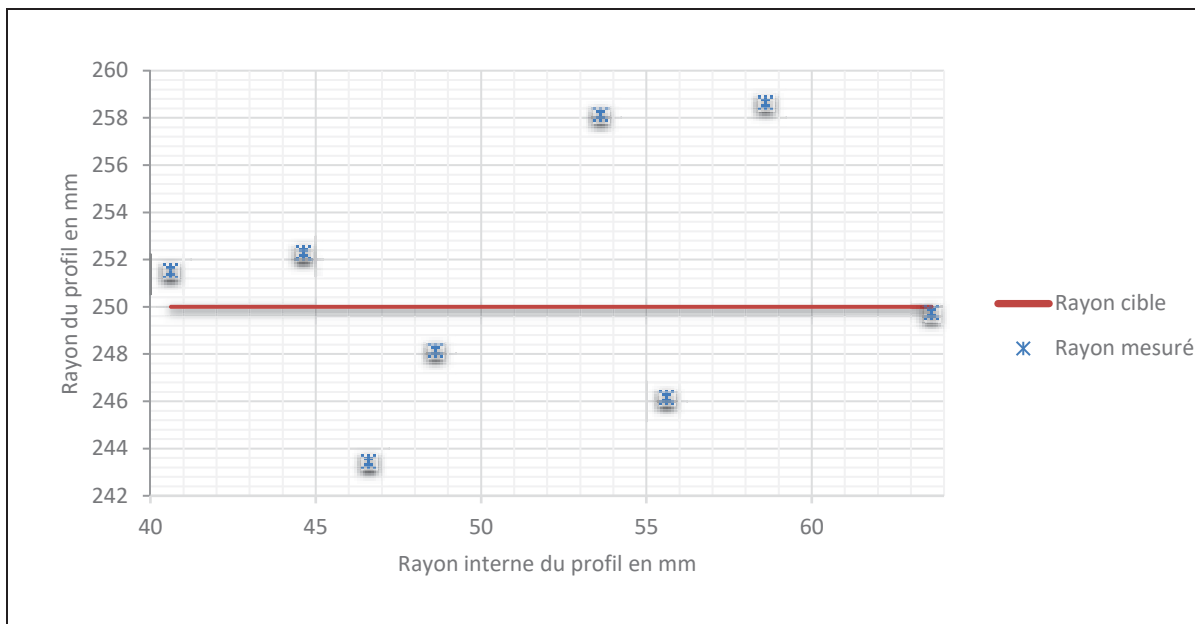


Figure 3.7 Courbe d'évolution du rayon du profil en fonction du rayon interne de la meule

La Figure 3.8 montre les numérisations de la surface du profil de la meule. L'objectif de la numérisation est de calculer le rayon du profil. L'écart entre les différents points sur le profil et la sphère moyenne calculé par Polyworks est présenté avec une échelle de couleur comme le montre la Figure 3.8.

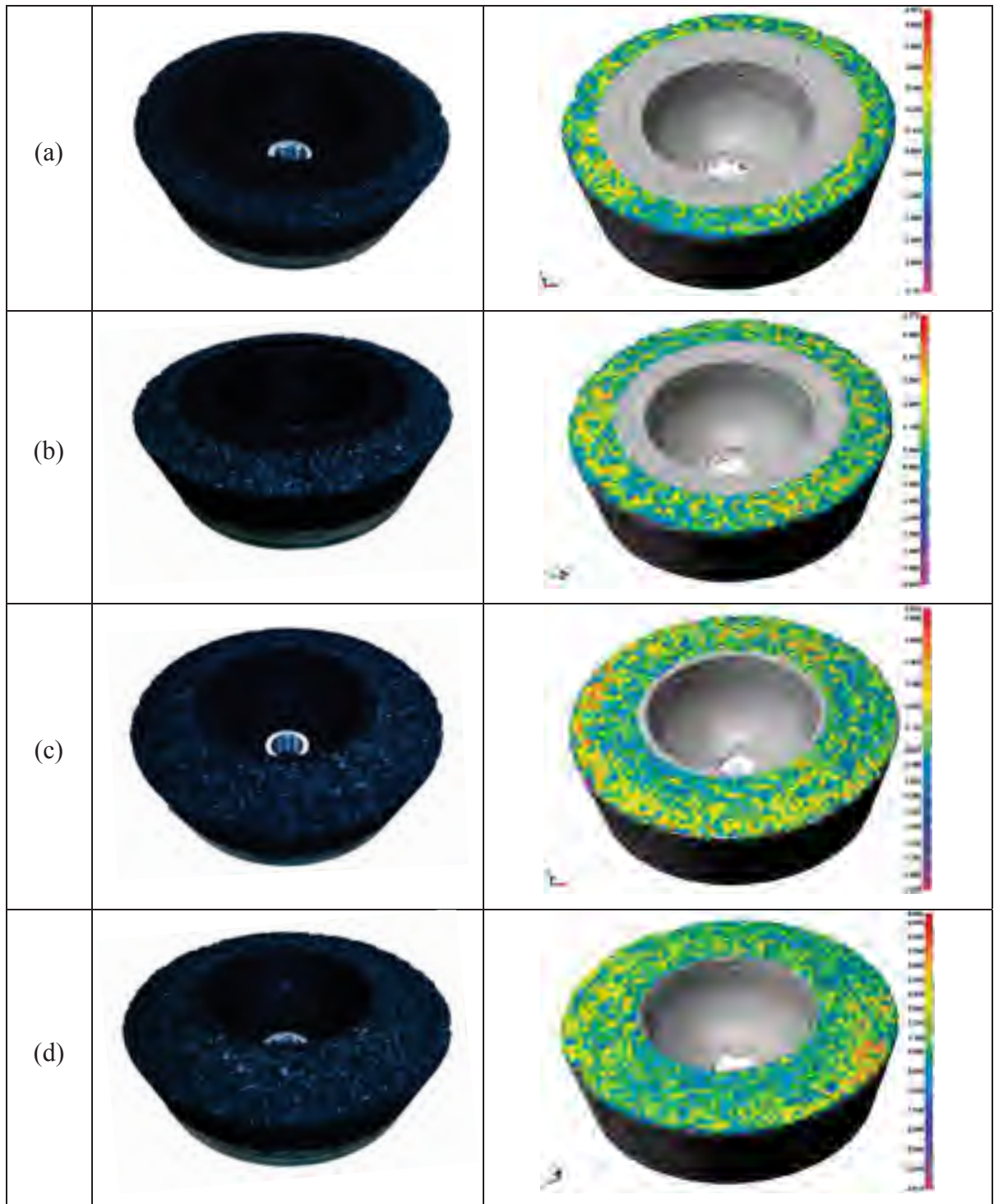


Figure 3.8 Photo réelle de la meule et numérisation du profil de la meule dans le régime transitoire

3.3.2.2 Régime permanent

Le régime permanent s'établit lorsque la meule devient totalement profilée. Dans ce régime le meulage s'effectue avec le modèle d'oscillation énoncé dans la section 2.5.

La Figure 3.9 montre la forme sphérique du profil de la meule dans le régime permanent.

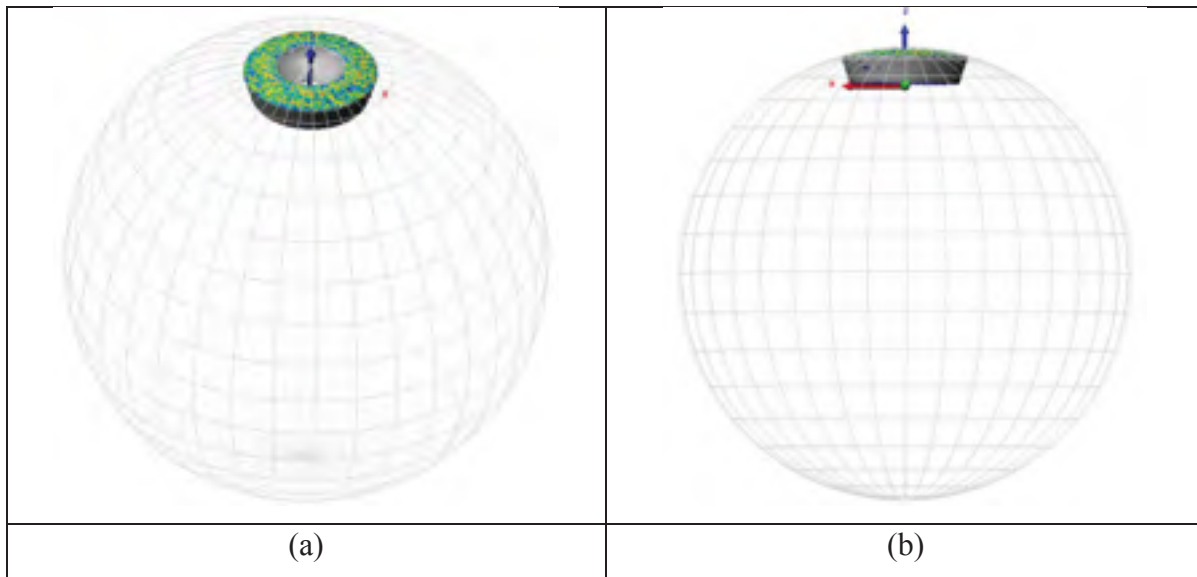


Figure 3.9 Profil sphérique de la meule dans le régime permanent
(a) vue isométrique (b) vue de face

La Figure 3.10 montre le graphe d'évolution du rayon du profil de la meule. L'erreur maximale entre le rayon du profil cible et le rayon du profil mesuré est de l'ordre de 4%.

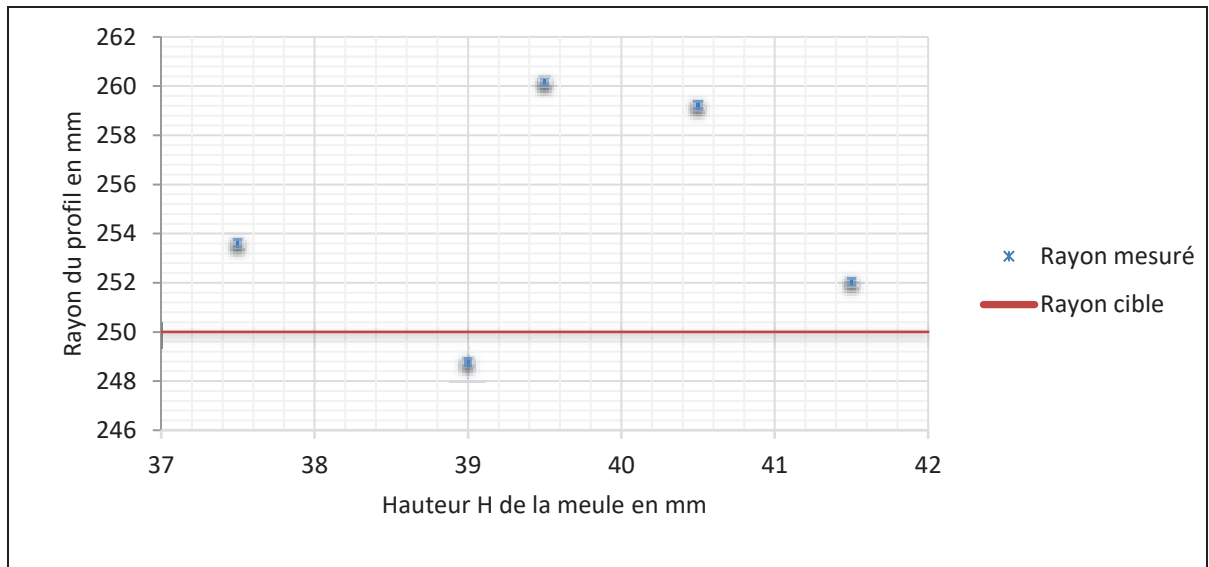


Figure 3.10 Courbe d'évolution du rayon du profil en fonction de la hauteur de la meule

Le Tableau 3-3 montre les numérisations de la surface du profil de la meule. L'écart entre les différents points du profil de la meule et la sphère moyenne calculé par Polyworks est présenté avec une échelle de couleur comme le montre le Tableau 3-3.

Tableau 3-3 Numérisation de la surface du profil de la meule

H (mm)	Rayon du profil (mm)	Numérisation 3D
41.5	252.034	

Tableau 3-3 (Suite)

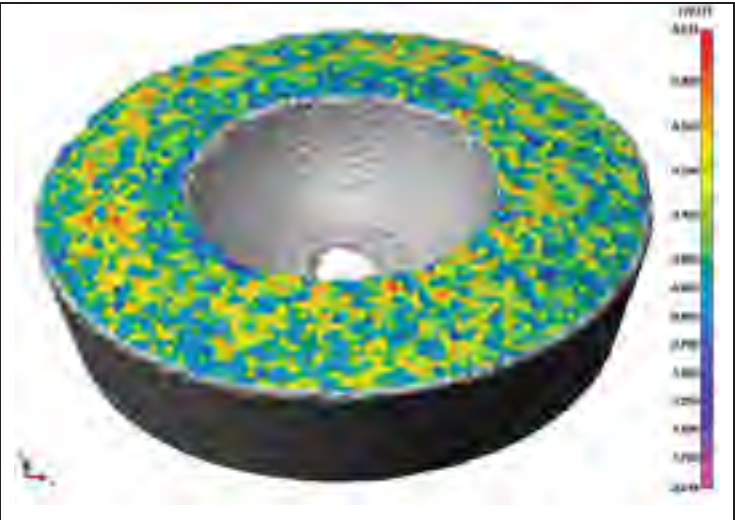
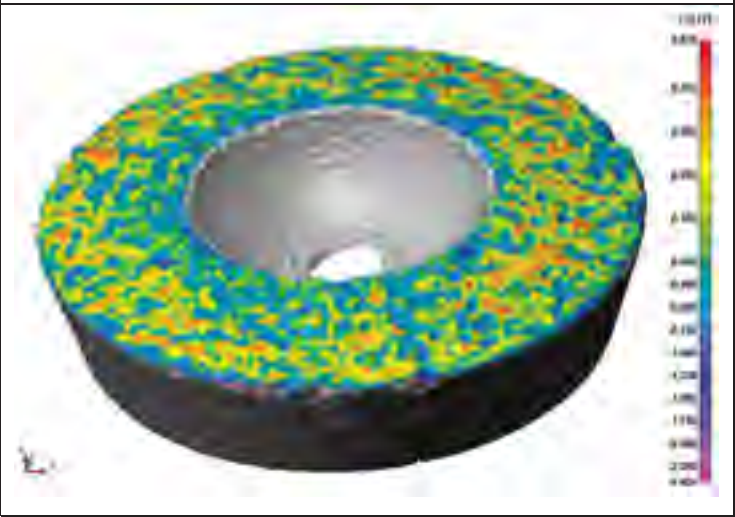
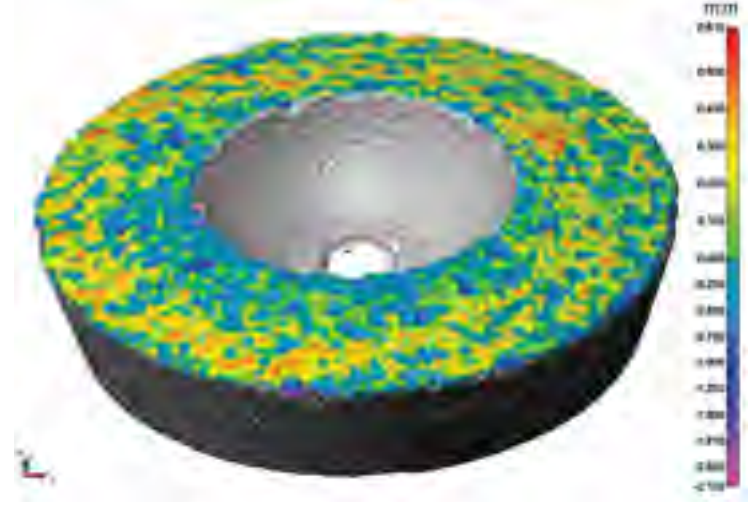
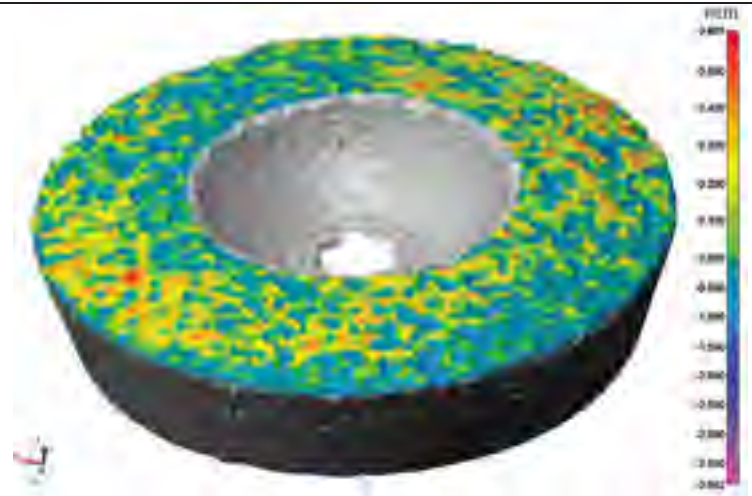
40.5	259.22	
39,5	260,17	

Tableau 3-3 (Suite)

39	248,77	
37,5	253,61	

3.3.3 État de surface de la plaque après le meulage

Un essai de meulage, avec oscillation et sans chevauchement de passes, est réalisé. L'objectif de cet essai est de valider l'efficacité du profil sphérique de la meule durant l'opération du meulage. Cet essai se déroule avec le plan d'expérience donné par le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 Plan d'expérience de meulage sans chevauchement

Paramètres	Valeurs
Puissance	1850 W
Distance entre les passes	30 mm
Vitesse d'avance	80 mm/s
Vitesse de rotation	6000 RPM

La Figure 3.11 montre l'image de l'entaille réalisée sur la pièce avec la meule. On remarque que la largeur varie très peu ce qui montre l'efficacité du choix du profil sphérique. La variation de la largeur de l'entaille est causée par la faible variation de la puissance de meulage.

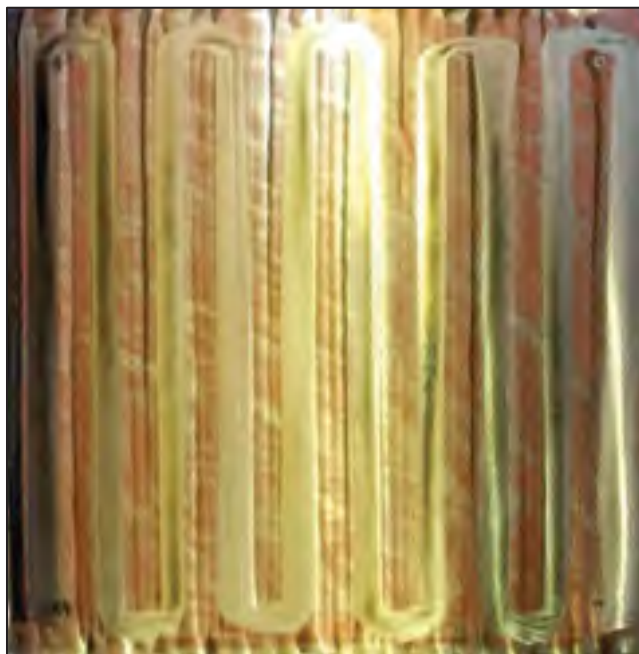


Figure 3.11 Meulage
sans chevauchement de passes

Un autre essai de meulage est réalisé avec chevauchement de passes avec le plan d'expérience donné par le Tableau 3-5.

Tableau 3-5 Plan d'expérience de meulage sans chevauchement

Paramètres	Valeurs
Puissance	1900 W
Distance entre les passes	6 mm
Vitesse d'avance	80 mm/s
Vitesse de rotation	6000 RPM

La Figure 3.12 montre la forme des entailles sur la plaque à meuler.



Figure 3.12 Meulage avec chevauchement de passes

3.3.4 Taux d'enlèvement de matière

Le taux d'enlèvement de matière est un bon indicateur pour valider l'efficacité du modèle d'oscillation.

Le modèle d'enlèvement de matière est utilisé pour estimer la puissance nécessaire pour assurer un taux d'enlèvement de matière donné. L'équation (3.1) présente le modèle d'enlèvement de matière proposé par Hazel (2004).

$$P = k_e S N n_c + k_c Z_w \quad (3.1)$$

Le modèle d'enlèvement de matière présenté par l'équation (3.1) est un modèle semi-empirique. Il faut rappeler que ce modèle tient compte de la nature vibro-impact du meulage avec le coefficient du nombre d'impacts par tour n_c . La surface de coupe S est en fonction du taux d'enlèvement de matière. N est la vitesse de rotation de la meule (RPM). Puisque ce modèle est semi-empirique, les coefficients k_e et k_c sont déterminés expérimentalement. Cet essai se déroule avec le plan d'expérience donnée par le Tableau 3-2. Le modèle d'enlèvement de matière présenté par l'équation (3.1) donne un coefficient de corrélation ajustée égale à 0.736, voir Figure 3.13.

Kurfess et al. (1988) ont proposé un modèle d'enlèvement de matière dédié aux opérations de meulage robotisé. Dans ce modèle, le taux d'enlèvement de matière varie linéairement en fonction de la puissance de meulage, voir équation (3.2).

$$Z_w = K_1 P + K_2 \quad (3.2)$$

Les coefficients K_1 et K_2 sont déterminés expérimentalement. Cet essai expérimental se déroule avec le plan d'expérience présenté par le Tableau 3-2. Le coefficient de corrélation ajusté généré avec ce modèle est égal à 0.738, voir Figure 3.13.

La Figure 3.13 montre la courbe en rouge présentée par l'équation (3.1). La réalisation de cette courbe est faite avec la méthode d'ajustement de courbe (*curve fitting*) dans Matlab. Les coefficients k_e et k_c sont déterminés avec ce module. La courbe en bleu donnée par l'équation (3.2) représente une régression linéaire du taux d'enlèvement de matière en fonction de la puissance de meulage.

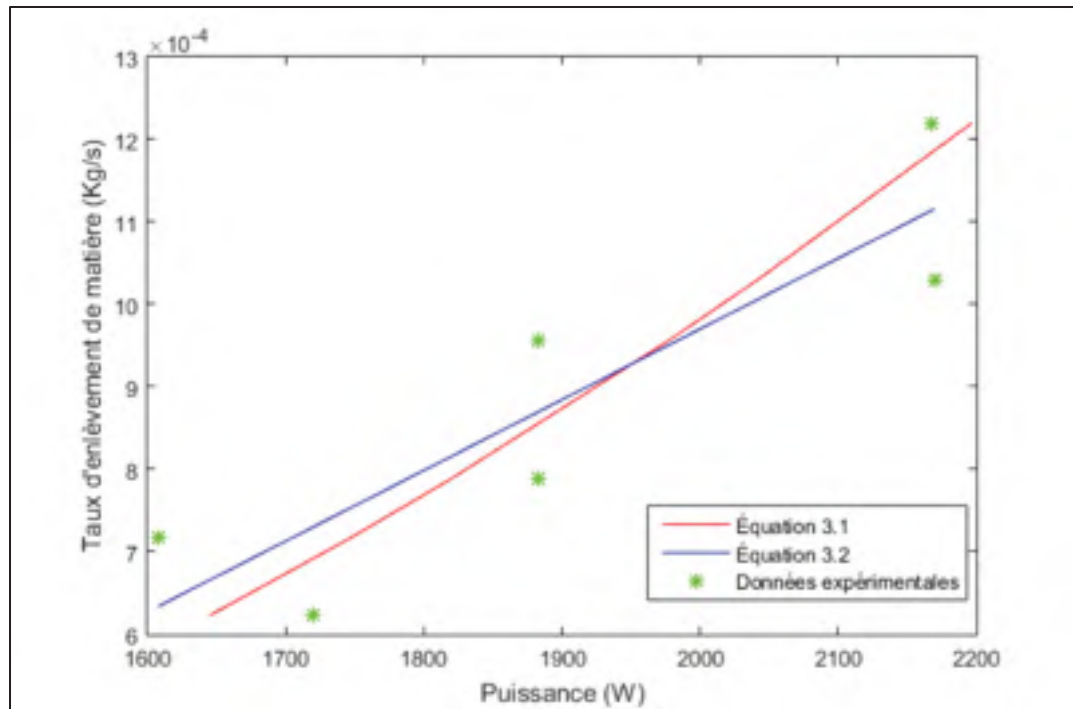


Figure 3.13 Puissance de meulage en fonction du taux d'enlèvement de matière

3.3.5 Taux d'usure

Dans la Figure 3.14, les données expérimentales du taux d'usure en fonction du taux d'enlèvement de matière sont représentées par le nuage des points en noir. La courbe en bleu représente le modèle d'usure donné par l'équation (3.3).

$$Z_s = k_1 Z_w^{k_2} \quad (3.3)$$

Les coefficients k_1 et k_2 sont déterminés avec la méthode d'ajustement de courbe (*curve fitting*) à l'aide du logiciel Matlab. Le coefficient de corrélation de ce modèle est égal à 0.9. Le coefficient de corrélation est très proche de 1 donc le modèle d'usure présenté par l'équation (3.3) peut représenter la valeur du taux d'usure en fonction du taux d'enlèvement de matière de façon correcte.

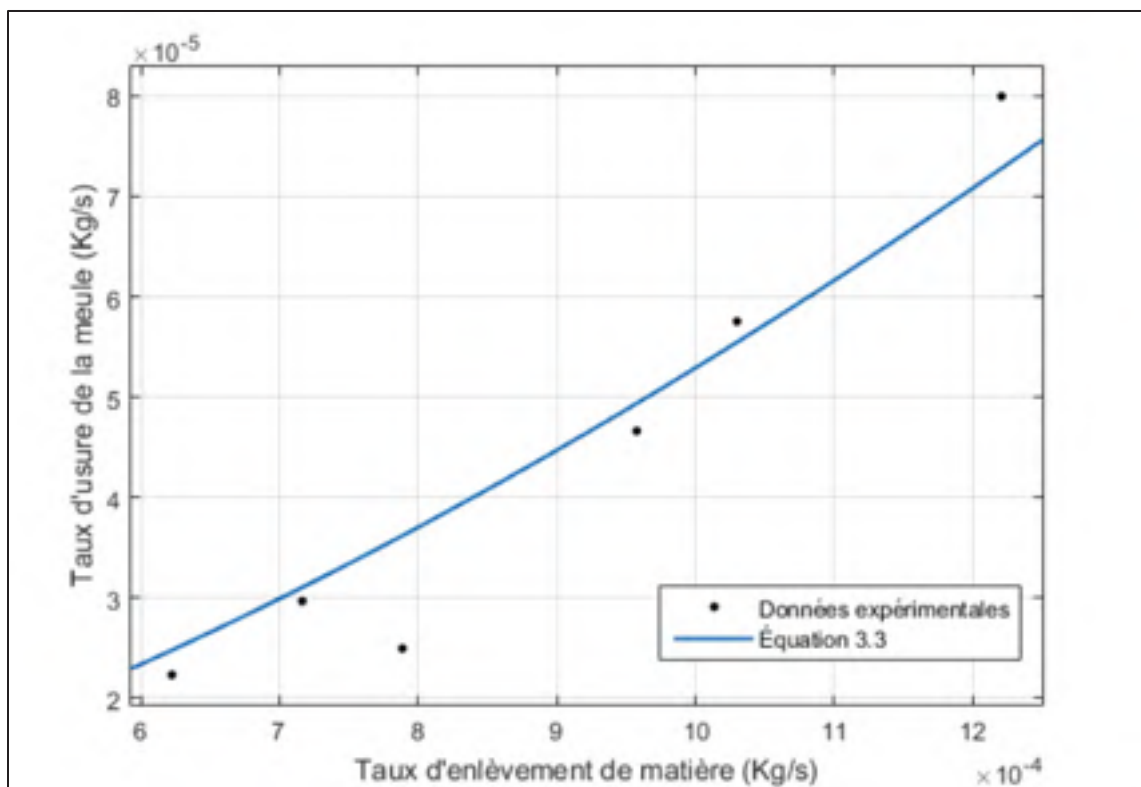


Figure 3.14 Taux d'usure de la meule en fonction du taux d'enlèvement de matière

CONCLUSION

L'objectif du projet consiste à développer une méthode de profilage des meules de type boisseau. Le profil sphérique de la meule assure une surface de coupe indépendante de l'angle de meulage. Le maintien du profil sphérique améliore le contrôle de l'enlèvement de matière.

Des équations mathématiques sont développées pour calculer les angles limites de meulage en fonction de l'usure de la meule. Une fonction d'oscillation est utilisée afin de contrôler le profil de la meule. Le contrôle d'enlèvement de matière et d'usure de la meule sont assurés respectivement avec les modèles d'enlèvement de matière et d'usure.

Pour le profilage de la meule, plusieurs solutions sont envisagées. La meilleure solution consiste à utiliser le robot pour profiler la meule. Cette solution est adoptée dans ce projet. Le profilage de la meule avec le robot est, d'une part, rapide et d'autre part, il augmente la durée de vie de la meule car au bout de 10 minutes de meulage le profil sphérique de la meule se forme. Ce profil est maintenu avec le modèle d'oscillation.

Plusieurs essais de meulage sont menés pour valider le modèle d'oscillation proposé dans le projet. Le meulage avec le modèle d'oscillation a donné de bons résultats. En effet, la forme sphérique du profil de la meule est maintenue et le rayon du profil varie avec une erreur de 4 %. Le meulage avec le modèle d'oscillation assure donc le maintien du profil sphérique de la meule. Le contrôle du taux d'enlèvement de matière est amélioré.

RECOMMANDATIONS

Dans le but d'améliorer les prochaines expériences, des recommandations sont présentées dans cette section. Voici la liste :

- Dans le meulage, le robot fait une déflexion angulaire triaxiale. Pour contrôler l'orientation de la meule par rapport à la plaque à meuler, nous recommandons l'utilisation d'un inclinomètre triaxial afin de mesurer la déflexion angulaire de la meule. Nous recommandons aussi de développer un algorithme de contrôle qui permet de compenser la déflexion de la meule mesurée par l'inclinomètre.
- L'échauffement de la meule au cours du meulage diminue la résistance mécanique du liant de la meule ce qui facilite le détachement des grains abrasifs du liant et engendre par la suite l'usure de la meule. Une augmentation ou une diminution de la température affecte le taux d'usure de la meule. Nous recommandons donc d'étudier l'influence de la température sur l'usure de la meule.
- Dans cette étude, nous avons supposé que le nombre d'impacts égale 1 impact/tour, mais dans la réalité le nombre d'impacts est différent de cette hypothèse. Nous recommandons dans les prochaines recherches de développer une méthode qui permet de déterminer le nombre d'impacts en temps réel à partir de la puissance de meulage mesurée et de la vitesse de rotation de la meule mesurée. La connaissance du nombre d'impacts/tour en temps réel permet de bien déterminer le modèle du taux d'enlèvement de matière.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agnard, S. (2013). *Étude du profilage d'outil de meulage dédié aux procédés robotisés* (École de technologie supérieure).
- Altintas, Y. (2000). *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge university press.
- Boudreault, É., Hazel, B., Côté, J., & Ben Tanfous, O. (2017). Développement et implantation du procédé de meulage avec oscillation angulaire. (Institut de recherche d'Hydro-Québec, Canada).
- Chen, Y., & Dong, F. (2013). Robot machining: recent development and future research issues. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-9.
- Douzet, J.-L. (1990). *Abrasifs*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Gagne, J.-L., Bédard-T, L., Lavoie, L., Hazel, B., Côté, J., Laroche, Y., & Mongenot, P. (2010). Robotic refurbishment of gate wheel tracks. Dans *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Hashemipour, M. (2014). Abrasive and non-traditional processes. Repéré à http://me.emu.edu.tr/me364/ME364_abrasive_grinding.pdf
- Hazel, B. (2004). Modèle d'enlèvement de métal du procédé de meulage avec meules cylindriques. (Varennnes : IREQ), 35.
- Hazel, B., Côté, J., Laroche, Y., & Mongenot, P. (2012). Field repair and construction of large hydropower equipment with a portable robot. *Journal of Field Robotics*, 29(1), 102-122.
- Jackson, M. J., & Davim, J. P. (2011). *Machining with abrasives*. Springer.
- Kalpajian, S. (2008). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson Education India.
- Kurfess, T. R., Whitney, D., & Brown, M. (1987). *Verification of a dynamic grinding model* (M. S.), Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering).
- Li, W. (2016). *Identification des paramètres modaux de systèmes mécaniques non stationnaires: application à un robot flexible de meulage* (École de technologie supérieure).

- Lindsay, R. P., & Hahn, R. S. (1971a). On the basic relationships between grinding parameters. *Annals of the CIRP*, 19(4), 657-666.
- Lindsay, R. P., & Hahn, R. S. (1971b). Variables affecting metal removal and specific power in precision grinding. *SME Paper MR71-269*, SME, Dearborn, Mich, 48128.
- Malkin, S., & Guo, C. (2008). *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. Industrial Press Inc.
- Marinescu, I. D., Hitchiner, M. P., Uhlmann, E., Rowe, W. B., & Inasaki, I. (2006). *Handbook of machining with grinding wheels*. CRC Press.
- Pereston, F. (1927). The theory and design of plate glass polishing machine. *J. soc. Glass technol*, 11, 214-256.
- Rafieian, F., Hazel, B., & Liu, Z. (2014). Vibro-impact dynamics of material removal in a robotic grinding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5-8), 949-972.
- Rafieian, F., Liu, Z., & Hazel, B. (2009). Dynamic model and modal testing for vibration analysis of robotic grinding process with a 6DOF flexible-joint manipulator. Dans *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on* (pp. 2793-2798). IEEE.
- Studer. (2012). Choix du bon outil de dressage. Repéré le 06/04/2016 à https://www.studer.com/fileadmin/content/www.studer.com/02_pdf/04_news/Newsletter/2012/2012_11/Outils_de_dressage_FR.pdf
- Subramanian, K. (1994). Finishing methods using multipoint or random cutting edges. *ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 1994.*, 90-109.
- Suzuki, H., Koderu, S., Nakasuji, T., Ohta, T., & Syoji, K. (1998). Precision grinding of aspherical CVD-SiC molding die. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 32(1), 25-30.
- Tahvilian, A. M., Hazel, B., Rafieian, F., Liu, Z., & Champlaud, H. (2016). Force model for impact cutting grinding with a flexible robotic tool holder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(1-4), 133-147.
- Thuot, D., Liu, Z., Champlaud, H., Beaudry, J., Richard, P.-L., & Blain, M. (2013). Remote robotic underwater grinding system and modeling for rectification of hydroelectric structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), 86-95.

